

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА



2409-5518
ISSN 2409-5516

ОБЩЕСТВЕННО-ДЕЛОВОЙ
НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

№8(187), август 2023

РГАСНТИ 44.09.29



**Российская
Энергетическая
Неделя 2023**

 **РОСКОНГРЕСС**
Пространство доверия



Тема номера

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И РЕШЕНИЯ
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГОБЕЗОПАСНОСТИ**





«Россети» –
вместе
в будущее



Лучшее создается вместе

Весь спектр банковских услуг

карты вклады счета кредиты

услуги для юр. лиц страхование

ипотека рефинансирование

gazprombank.ru

Банк ГПБ (АО). Ген. лицензия ЦБ РФ № 354. Реклама.



Содержание



Слово редакторов

- 7 **В. Бушуев, А. Горшкова.** Фундаментальные вопросы

Энергопереход

- 8 **Ю. Плакиткин.** Глобальный энергетический переход и современные мировые трансформации в прогнозах развития энергетики

Технологии

- 26 **Д. Холкин, И. Чаусов, А. Шуранова.**
Энергетика беспилотных авиационных систем
38 **А. Арифиллин, Е. Заруба.** Российский рассольный литий: проблемы и возможности

Регионы

- 48 **А. Мастепанов, А. Сумин, Б. Чигарев.** ЮАР: проблемы энергетического перехода и энергетической безопасности

Атом

- 70 **А. Пустовгар, В. Потапов, А. Адамцевич, В. Ильин, Л. Адамцевич.** Управление старением бетонных конструкций АЭС

Энергетика

- 82 **Д. Крупенёв, Н. Беляев, В. Локтионов.** Обоснование нормативов показателей балансовой надёжности на современном этапе развития электроэнергетических систем России



Contents

Editor's Column

- 7 **V. Bushuev, A. Gorshkova.** Fundamental issues

Energy transition

- 8 **Y. Plakitkin.** Global Energy Transition and Modern World Transformations in Energy Development Forecasts

Technologies

- 26 **D. Kholkin, I. Chausov, A. Shuranova.**
Power engineering of unmanned aircraft systems
38 **A. Arifullin, E. Zaruba.** Russian brine lithium: problems and opportunities

Regions

- 48 **A. Mastepanov, A. Sumin, B. Chigarev.** South Africa: problems of energy transition and energy security

Nuclear Energy

- 70 **A. Pustovgar, V. Potapov, A. Adamtsevich, V. Ilyin, L. Adamtsevich.** Control of aging of concrete structures of nuclear power plants

Energy

- 82 **D. Krupenev, N. Belyaev, V. Loktionov.** Substantiation of standards for adequacy indicators at the present stage of development of electric power systems in Russia

УЧРЕДИТЕЛЬ

Министерство энергетики Российской Федерации, 107996, ГСП-6, г. Москва, ул. Щепкина, д. 42

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ

ФГБУ «РЭА» Министерства энергетики Российской Федерации

НАУЧНО-РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

В. В. Бушуев – д. т. н., проф., г. н. с. ОИВТ РАН
Е. О. Адамов – д. т. н., науч. рук. АО «НИКИЭТ»
В. М. Батенин – член-корр. РАН, д. т. н., проф.
П. П. Безруких – д. т. н., проф. НИУ МЭИ
В. И. Богоявленский – член-корр. РАН, д. т. н., проф., г. н. с. ИПНГ РАН
А. И. Громов – к. г. н., гл. директор по энергетическому направлению Фонда «ИЭФ»
А. Н. Дмитриевский – акад. РАН, д. г.-м. н., научный руководитель ИПНГ РАН
С. А. Добролюбов – акад. РАН, д. г. н., проф., декан географического факультета МГУ

О. В. Жданев – д. т. н., ЦКТР ТЭК
В. М. Зайченко – д. т. н., проф., г. н. с. ОИВТ РАН
М. Ч. Залиханов – акад. РАН, д. г. н., проф., зав. ЦГИЧС КБГУ
В. М. Капустин – д. т. н., проф., зав. кафедрой РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина
В. А. Крюков – акад. РАН, д. э. н., директор ИЭОПП СО РАН
А. И. Кулапин – д. х. н., ген. директор ФГБУ «РЭА» Минэнерго России
В. Г. Мартынов – к. г.-м. н., д. э. н., проф., ректор РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина
А. М. Мастепанов – акад. РАН, д. э. н., г. н. с. АЦЭПБ ИПНГ РАН

Н. Л. Новиков – д. т. н., проф., зам. науч. рук. АО «НТЦ ФСК ЕЭС»
В. И. Рачков – член-корр. РАН, д. т. н., проф.
П. Ю. Сорокин – первый зам. министра энергетики РФ
Д. А. Соловьев – к. ф.-м. н., научный сотрудник Института океанологии РАН
В. А. Стенников – акад. РАН, д. т. н., проф., директор ИСЭ им. Мелентьева СО РАН
Е. А. Телегина – член-корр. РАН, д. э. н., проф., декан фак-та РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина
С. П. Филиппов – акад. РАН, д. т. н., директор ИНЭИ РАН
А. Б. Яновский – д. э. н., к. т. н.

Главный редактор
Анна Горшкова

Научный редактор
Виталий Бушуев

Зам. главного редактора по продвижению
Виолетта Локтева

Корректор
Роман Павловский

Фотограф
Иван Федоренко

Дизайн и верстка
Роман Павловский

Адрес редакции:
129085, г. Москва, проспект Мира, д. 105, стр. 1
+79104635357
anna.gorshik@yandex.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № 77–75080 от 07.03.2019

Журнал «Энергетическая политика» входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК

При перепечатке ссылка на издание обязательна

Перепечатка материалов и использование их в любой форме, в том числе в электронных СМИ, возможны только с письменного разрешения редакции

Редакция не несет ответственности за содержание рекламных материалов

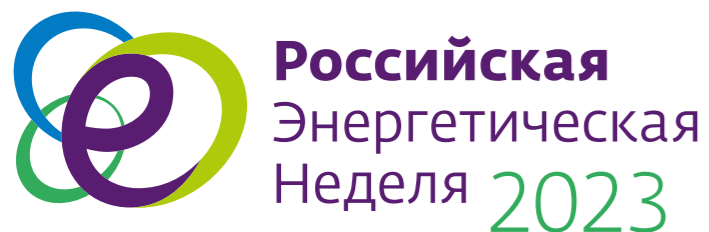
Редакция не имеет возможности вступать в переписку, рецензировать и возвращать не заказанные ею рукописи и иллюстрации

Тираж 1000 экземпляров
Периодичность выхода 12 раз в год
Цена свободная

Отпечатано в ООО «КОНСТАНТА», 308519, Белгородская область, Белгородский р-н, п. Северный, ул. Березовая, 1/12
E-mail: info@konstanta-print.ru

Подписано в печать: 05.08.2023

16+



Российская
Энергетическая
Неделя 2023



РОСКОНГРЕСС

Пространство доверия



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ПРАВИТЕЛЬСТВО МОСКВЫ

10 ОКТЯБРЯ 2023

ОРГАНИЗАТОР
РЭА
МИНЭНЕРГО РОССИИ



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



ТЕРРИТОРИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ДИАЛОГА

МЕРОПРИЯТИЕ ПРОВОДИТСЯ
В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО
ФОРУМА «РОССИЙСКАЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ НЕДЕЛЯ»



Российская
Энергетическая
Неделя 2023



РОСКОНГРЕСС
Пространство доверия

11–13 октября
Москва,
ЦВЗ «Манеж»

rusenergyweek.com

Реклама 6+

tedconf.ru





Виталий БУШУЕВ
Научный редактор журнала
«Энергетическая политика», акад. РАЕН и РИЭ, д. т. н.



Анна ГОРШКОВА
Главный редактор журнала
«Энергетическая политика»

Фундаментальные вопросы

Национальная энергетическая безопасность и технологический суверенитет являются составной частью современного этапа экономического развития России. С этим утверждением никто не будет спорить. Однако пути и средства достижения энергобезопасности в текущих геополитических условиях до конца не сформированы. До сих пор нет четкого понимания, какие именно технологические задачи являются первоочередными, как в отсутствие свободного рынка увязать единую систему потребности промышленности и возможности российских предприятий, особенно в энергетической отрасли?

На этом фоне все еще идут бурные дискуссии о перспективах развития самой энергетической отрасли: продолжать ли развивать традиционные направления или делать ставку на возобновляемую и атомную энергетику? С точки зрения огромных запасов нефти и газа и текущих запросов рынка, инвестиции в развитие углеводородной энергетики более эффективны

и целесообразны. Однако в долгосрочной перспективе, нетрадиционные способы производства энергии будут все более востребованы. До сих пор нет ответа, когда в России этот перелом может произойти и как не пропустить тот поворотный шаг в развитии и применении новых технологий, чтобы не остаться навсегда промышленными аутсайдерами?

Так же нет ответа на вопрос: как быстро сами энергетические компании смогут переориентировать свой бизнес от традиционного добывающего и перерабатывающего сектора к новым энергетическим направлениям? Последний вопрос является, пожалуй, наиболее острым, так как каждое предприятие – это и большое количество рабочих мест. Так что трансформация производств потянет серьезные социальные преобразования.

Ответы на эти вопросы сложно будет найти за один день. Да и предложенные решения вряд ли окажутся универсальными для всей отрасли.

Глобальный энергетический переход и современные мировые трансформации в прогнозах развития энергетики

Global Energy Transition and Modern World Transformations in Energy Development Forecasts

Юрий ПЛАКИТКИН
Профессор, д. э. н.,
академик РАН
E-mail: anna.gorshik@yandex.ru

Yuri PLAKITKIN
Professor, Doctor of Economics, Academician
of the Russian Academy of Natural Sciences
E-mail: anna.gorshik@yandex.ru

Транспортировка угля по р. Рейн, Германия

Источник: bilanol.i.ua / depositphotos.com



Аннотация. В статье рассмотрены вопросы взаимосвязи современных мировых трансформаций, в т. ч. технологических с реализацией глобального энергоперехода. Приведены основные его закономерности, влияющие на формирование будущего облика мировой энергетики. Представлены результаты прогноза плотностей энергии, достигаемых в различных энергоисточниках. Рассмотрены принципиальные варианты развития российской энергетики. Приведен прогнозный контур предстоящих изменений в энергетических технологиях.

Ключевые слова: мировые трансформации, закономерности энергетического перехода, плотность энергии, энергетические импульсы, цивилизационное развитие, космические технологии, энергетические технологии, варианты развития энергетики.

Abstract. The article deals with the issues of the relationship of modern world transformations, incl. technological with the implementation of the global energy transition. Its main laws that influence the formation of the future image of the world energy are given. The results of forecasting the energy densities achieved in various energy sources are presented. The principal options for the development of the Russian energy sector are considered. The predictive outline of the upcoming changes in energy technologies is given.

Keywords: world transformations, patterns of energy transition, energy density, energy impulses, civilizational development, space technologies, energy technologies, energy development options.

//

Существует явная и довольно сильная взаимозависимость между численностью населения мира и объемом потребления первичной энергии

Введение

«Мы не выбираем времена, времена всегда выбирают нас». Это известное выражение из книги Дж. Р. Р. Толкина «Властелина колец», наверно, по существу отражает неизбежность тех событий, которые в настоящее время происходят в мире. Действительно, нам выпало жить в уникальный период времени, когда на наших глазах рушится привычная картина мира. Происходят гигантские геополитические, экономические, технологические и культурно-нравственные трансформа-

ции. Конечно, сложившаяся ситуация носит «многослойный» характер. Однако, если с нее снять политические, экономические, технологические и другие «одежды», то в «сухом остатке» останутся такие фундаментальные категории как пространство, время, материя и, конечно же, энергия. Причем, последняя отвечает за все возможные виды движения (изменения) происходящего в материальном и виртуальном (информационном) пространствах.

Так или иначе, все изменения, происходящие в сфере использования человечеством энергии, отражаются во всех взаимосвязанных сферах его деятельности. Энергетика, находясь в самых нижних «слоях» пределов общественного продукта, влияет на все сегменты его производства и потребления и во многом определяет текущую ситуацию и будущее мировое развитие.

Глобальный энергопереход и мировое технологическое развитие

В последнее время, осуществляя прогнозы мирового потребления энергии, многие эксперты связывают его с энергетическим переходом. При этом некоторые из них отождествляют такой переход

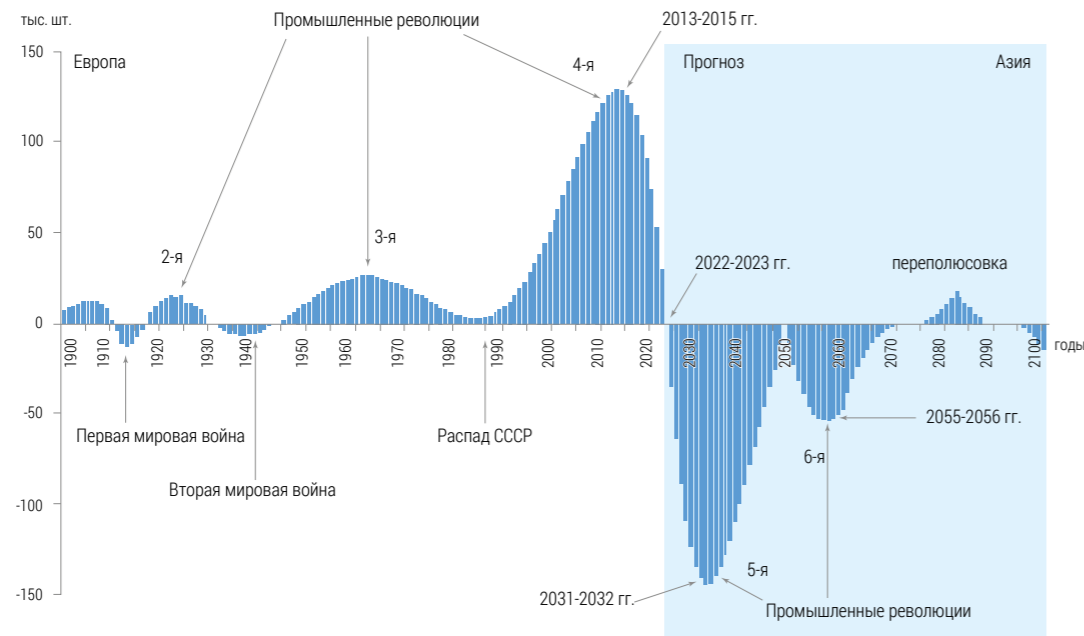


Рис. 1. Динамика скорости мирового инновационно-технологического развития (по среднегодовому приросту мировых патентных заявок)

то с реализацией так называемой «климатической повестки», то с декарбонизацией мировой экономики и развитием «зеленой» энергетики, то со сменой одних источников энергии на другие.

Да, все это, конечно, имеет место, но лишь отчасти. Дело в том, что помимо локальных переходов смены энергоисточников, происходящих в энергетике на протяжении многих лет и вовсе не связанных с изменением климата, существует еще и глобальный энергопереход, имеющий важное цивилизационное значение.

В этой связи отметим существенную, довольно сильную взаимозависимость между численностью населения мира и объемом потребления первичной энер-

гии. Многие аналитики утверждают, что в скорости роста численности населения мира в настоящий период развивается процесс закономерного торможения. При этом, они ссылаются на расчеты и выводы, сделанными в свое время С. П. Капицей [1, 2], о наступлении цивилизационного демографического перехода, приводящего, как минимум, к «выполаживанию» численности населения мира, на уровне, примерно, 11 млрд человек. Учитывая выше приведенную связь, можно предположить, что подобный цивилизационный переход должен состояться и в глобальной энергетике.

Подтверждением этому является переходный процесс, осуществляемый в мировом инновационно-технологическом развитии. Последнее можно оценивать потоком мировых патентных заявок.

В этой связи на основе статистических данных за последние 120 лет [3, 4] проведены расчеты по оценке ускорения мирового инновационно-технологического развития (по среднегодовому приросту мировых патентных заявок).

Результаты расчетов ретроспективной и прогнозной динамики этого показателя приведены на рис. 1.

На представленной циклической кривой изменения расчетного показателя показана не только динамика мирового инновационно-технологического разви-

тия, но и «точки» геополитического «напряжения». Среди них – Первая и Вторая мировые войны и распад СССР. Весьма четко на графике (см. рис. 1) по «пикам» циклов идентифицируются мировые промышленные революции. При этом, циклы мирового технологического процесса «цепляют» за собой циклы геополитического развития. Геополитика и технологическое развитие взаимосвязаны в едином процессе мирового цивилизационного развития.

Достаточно любопытным является обстоятельство наличия «пика» в последнем цикле современного этапа технологического развития. Он приходится, примерно, на 2014 г. Отметим, что именно с этого момента начала активизироваться фаза существенного нарастания мировой геополитической напряженности.

Результаты расчетов указывают на постоянную качественную смену состояния мирового инновационно-технологического развития. Оно – за пределами 2022–2023 гг. и будет меняться на противоположное. В этот момент времени геополитическая напряженность, вероятно, усилится до максимального значения, а затем, примерно в начале 30-х гг. XXI века, перейдет в затухающую фазу.

Глобальный технологический переход вызывает гигантский перелом всех ранее устоявшихся тенденций мирового развития. И это новое качество развития основано на глобальном энергопереходе

В настоящее время мировое технологическое развитие находится на пороге входа в совершенно иное качественное состояние (см. «отрицательная» зона графика на рис. 1), которого никогда не было за все время развития цивилизации. Фактически, 2022–2023 гг. – это период начала глобального технологического перехода.

Учитывая вхождение в «отрицательную» зону графика, можно предположить, что цивилизация входит в процесс формирования технологий принципиально иного типа. Не развивая далее эту тему, отметим «пиковые» точки будущего технологического развития. Это периоды 2031–2032 гг.

Солнечные панели для энергообеспечения МКС

Источник: 3DSculptor / depositphotos.com



В настоящее время мировое технологическое развитие находится на пороге входа в совершенно иное качественное состояние, которого никогда не было за все время развития цивилизации

Динамика инновационного развития почти полностью совпадает с динамикой потребления энергии. По уровню мирового потребления энергии можно судить об уровне технологического развития

и 2055–2056 гг. Зафиксируем их, они проявятся и далее при анализе результатов прогноза развития глобальной энергетики. Вероятнее всего, вышеприведенные периоды связаны с реализацией пятой и шестой промышленных революций. Глобальный технологический переход вызывает гигантский перелом всех ранее устоявшихся тенденций мирового развития. И это новое качество технологического развития основано на цивилизационном изменении его фундамента – глобальном энергетическом переходе.

Дело в том, что существует одна из базовых закономерностей энергетики –

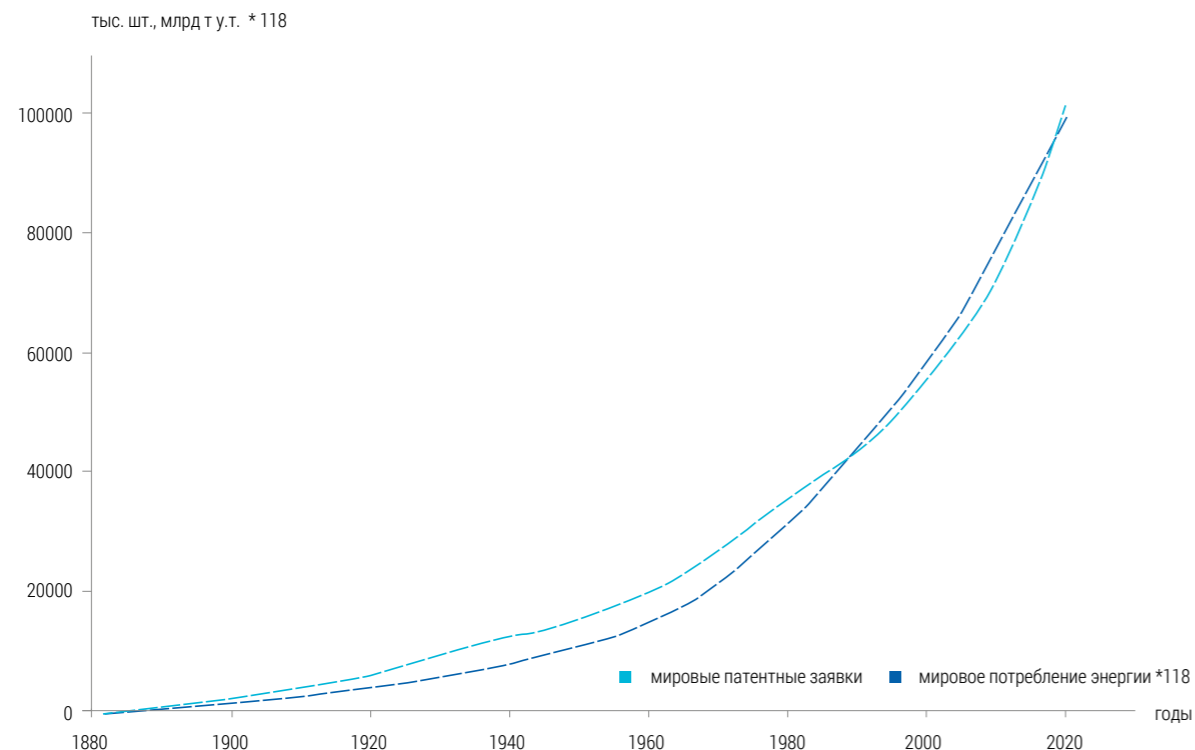
опережающее развитие энергоисточников по сравнению с применением новых технологий. Так, например, в первую промышленную революцию опережающим источником энергии был уголь, во вторую – нефть, в третью – газ, четвертую – нетрадиционные источники энергии. Новые энергоисточники всегда появлялись ранее новых технологий.

Действительно, сначала появился энергоисточник – уголь, и только затем – паровой котел, паровозы, железные дороги, вокзалы, а вовсе не наоборот. Появился новый энергоисточник – нефть, и только затем – двигатель внутреннего сгорания, шоссе, дороги, автобаны и заправки, а не наоборот.

Развитие энергетики, опережая развитие технологий, во многом определяет темпы инновационно-технологического процесса. Дополнительным косвенным подтверждением этого тезиса являются результаты сопоставления динамики мирового инновационно-технологического развития и мирового потребления энергии (рис. 2).

Представленные расчеты, основанные на данных за последние 140 лет [5], свидетельствуют о том, что динамика мирового

Рис. 2. Динамика уровней мирового инновационно-технологического развития (по количеству мировых патентных заявок в накопленном итоге) и мирового потребления энергии (в накопленном итоге)



Добыча нефти в ХМАО

Источник: panaramka.ukr.net / depositphotos.com

инновационного развития почти полностью совпадает с динамикой мирового потребления энергии. Оказывается, по уровню мирового потребления энергии (в накопленном итоге) можно судить об уровне технологического развития.

Подытоживая выше приведенное, можно констатировать, что если инновационно-технологическое развитие вошло в процесс глобального цивилизационного перехода, то мировая энергетика также находится на стадии перехода – глобального энергетического перехода.

Каким же показателем можно характеризовать процесс глобального энергетического перехода? Учитывая, что уровень инновационно-технологического развития зависит от объемов потребления энергии, воспользуемся простой формулой расчета энергии:

$$E_t = q_t \times m_t \quad (1)$$

где:

q_t – текущая плотность энергии топлива (энергия, приходящаяся на единицу массы топлива) в t-ом году;

m_t – масса топлива, использованного в t-ом году.

В этой формуле за процесс постоянно-го роста «отвечает» показатель q_t ; В физике этот показатель называют теплотворной способностью топлива, а в энергетике

его оценивают относительной величиной, называемой калорийным эквивалентом используемого топлива. Рост показателя q_t в перспективе приводит к уменьшению массы используемого топлива. Мировая статистика подтверждает, что масса используемого топлива в настоящий период времени уже прекратила свой рост и перешла в стадию системного снижения. Таким образом, можно принять, что плотность энергии (на массу) применяемых источников (калорийный эквивалент) отражает восходящий уровень развития энергетики, соответствующий постоянно возрастающему уровню технологического развития.

Применяемые традиционные источники энергии, например, дрова, уголь, нефть, газ, в процессе геологической эволюции были сформированы под воздействием именно солнечного излучения

Темп изменения во времени этого показателя характеризует скорость смены энергоисточников и, соответственно, определяет скорость научно-технологических преобразований. Однако последняя может измеряться частотой появления новых технологий. При этом период жизни применяемых технологий постоянно сокращается, а частота их смены – увеличивается. В то же время проведенными исследованиями установлено [6], что плотность энергии (калорийный эквивалент) применяемых

источников энергии. В целом, можно принять что:

$$v = b \times v_{нтр} \quad (3)$$

где:
 b – коэффициент пропорциональности;
 $v_{нтр}$ – частота научно-технологического развития.

Научно-технологического развитие осуществляется за счет генерирования новых знаний. Одной из базовых потребностей человека является потребность в познании нового, т. е. в расширении накопленных



Запуск ракеты. Байконур, Казахстан

Источник: mulderphoto / depositphotos.com

источников энергии пропорционален частоте излучения ими электромагнитных волн:

$$q = a \times v \quad (2)$$

где:
 a – коэффициент пропорциональности;
 v – частота излучения конкретного источника энергии.

Если плотность энергии (калорийный эквивалент) применяемого источника энергии определяет скорость научно-технологического развития, оцениваемого частотой смены технологий, то можно сделать вывод о соответствии частотам научно-технологического развития частотам волн электромагнитного излучения применяе-

мых источников энергии. Этот процесс познания нового носит перманентный характер. В этой связи выражение (3) указывает на перманентный цивилизационный рост частоты излучения используемых источников энергии и, соответственно, величины плотности энергии (калорийного эквивалента) ими обеспечиваемой.

Получается, что частота появления новых научно-технологических знаний, формируемых в обществе, может оцениваться частотой излучения используемых источников энергии. Однако, применяемые традиционные источники энергии (например, дрова, уголь, нефть, газ) в процессе геологической эволюции были сформированы

Формирование новых научно-технологических знаний определяется частотой излучения Солнца, поступающего к нам из космоса, т. е. частота вибраций, приходящих из космоса, соответствует частоте научно-технологического развития

под воздействием солнечного излучения. Это своеобразные солнечные «консервы», «припасенные» природой для человечества. Нетрадиционные же источники энергии уже без всякой консервации позволяют человеку «напрямую» использовать солнечное излучение [7]. Выходит, что формирование новых научно-технологических знаний определяется частотой излучения Солнца, поступающего к нам из космоса, т. е. частота вибраций, приходящих из космоса, соответствует частоте научно-технологического развития. Это означает, что для человечества космос является своеобразной «кладовой» новых знаний. Человек стремится

в космос за все новыми и новыми знаниями. Не развивая далее этот тезис, отметим, как было установлено ранее, перманентный цивилизационный рост уровня знаний и, соответственно, плотности энергии применяемых источников.

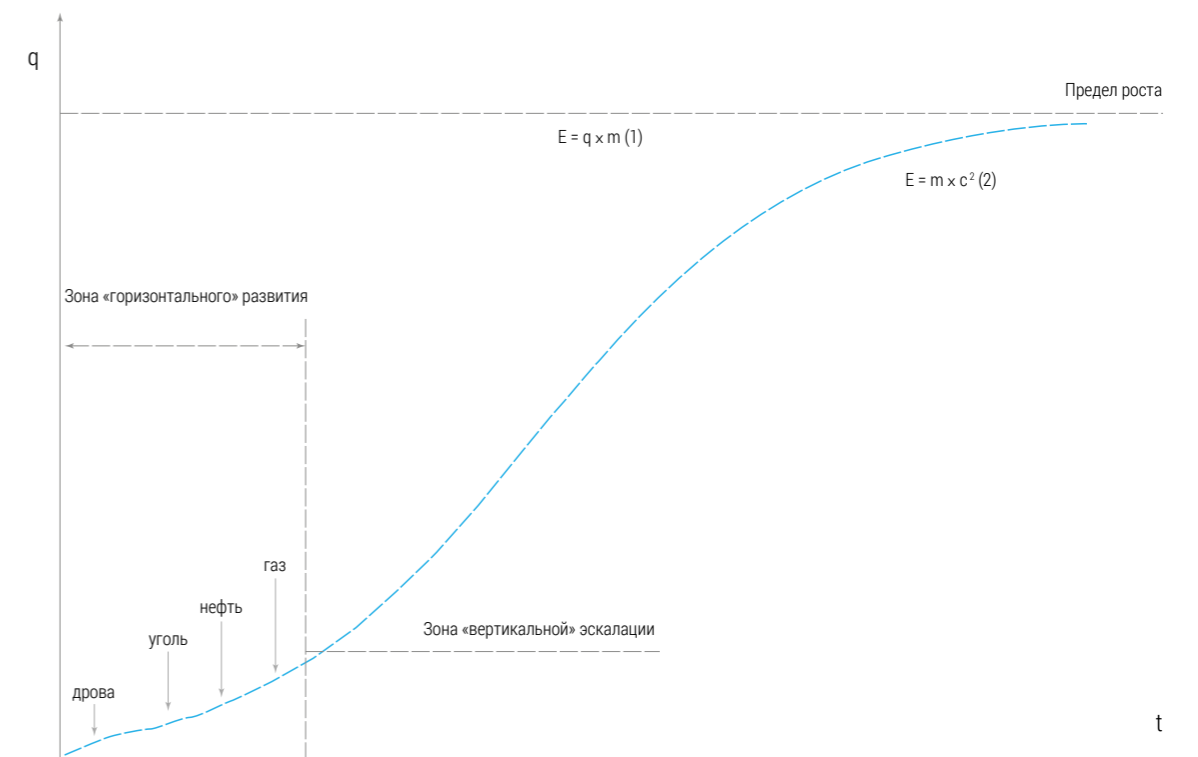
Однако, рост этой плотности (калорийного эквивалента) применяемых источников энергии имеет свой предел. Он определяется формулой Эйнштейна [8]:

$$E = m \times c^2 \quad (4)$$

Квадрат скорости света – это предельная величина роста плотности энергии (калорийного эквивалента) используемых энергоисточников. Наличие такого предела определяет S-образный перманентный рост их плотности энергии (калорийных эквивалентов) (рис. 3).

Дрова с калорийным эквивалентом 0,3 т у. т./т, уголь – 0,7 т у. т./т, нефть – 1,44 т у. т./т, газ – 1,8 т у. т./т – это все последовательно вводимые в хозяйственный оборот традиционные источники энергии, повышающие средний калорийный эквивалент в глобальной энергетике. Калорийный эквивалент используемых энергоисточников будет асимптотически возрастать до своего предела. Этот рост носит цивилизационный

Рис. 3. Перманентный S-образный рост калорийных эквивалентов (плотности энергии) применяемых энергоисточников



характер. Отметим, что подобный S-образный рост является главной особенностью динамики коэффициента полезного действия (КПД). Последний во многом определяет уровень научно-технологического развития. Это дополнительно подтверждает ранее приведенный тезис о возможности измерения уровней технологического развития значениями плотности энергии энергоисточников.

Изменение климата, политических, экологических и других условий не являются причиной смены энергоисточников и, соответственно, повышения калорийного эквивалента в глобальной энергетике. Оно было всегда и будет продолжаться всегда потому, что человечеству необходимы источники энергии со все большей и большей плотностью энергии, и это дорога с односторонним движением вверх и только вверх.

Ни «зеленая сделка», ни Парижское соглашение по климату не в состоянии изменить направленность установленной закономерности. Они лишь могут либо ускорить, либо замедлить темпы «движения» плотности энергии по S-образной кривой. Провозглашенная декарбонизация мировой экономики ускоряет «движение» энергетики по S-образной кривой и подталкивает к переходу на другие энергоисточники с более высокой плотностью энергии. Если бы не было «зеленой сделки», то человечество все равно бы «придумало» механизмы, «заставляющие» энергетику более ускоренно повышать плотность энергии энергоисточников.

S-образная кривая роста калорийного эквивалента состоит из трех базовых участков: первый – нижнее горизонтальное развитие, второй – вертикальная эскалация, третий – верхнее горизонтальное

Изменение климата, политических, экологических и других условий не являются причиной смены энергоисточников и, соответственно, повышения калорийного эквивалента в глобальной энергетике



Проект создания водородных высокоскоростных ж/д поездов

Источник: lurii / depositphotos.com

развитие. Отметим, что традиционные энергоисточники занимают зону горизонтального развития.

Главной интригой текущего момента является ответ на вопрос: в какой же период времени горизонтальное развитие, наконец, перейдет в форму вертикальной эскалации? Когда произойдет ломка горизонтальной тенденции развития? Оценка калорийных эквивалентов, проведенная на основе сопоставления соответствующих им частот электромагнитных волн энергоисточников, дало возможность для определения уровней этих частот, достигаемых в солнечных и ветровых источниках энергии.

Согласно полученным оценкам, солнечные источники энергии могут характеризоваться калорийным эквивалентом 5÷6 т у. т./т, а ветровые – 4÷5 т у. т./т. Однако это в 2–3 раза больше, чем его значение для газа, в 4 раза – чем для нефти и в 8–9 раз – чем для угля. Фактически, применение солнечных и ветровых источников означает начало перехода энергетики в зону вертикальной эскалации. Вхождение энергетики в зону вертикальной эскалации – это и есть начало глобального энергетического перехода.

Зачем человечество стремится к повышению плотности энергии используемых энергоисточников?

Отметим, что период, начинающийся после второй четверти XXI века, будет связан с применением источников с высокими и очень высокими калорийными эквивалентами.

Во что же реализуется потенциальная энергия применяемого энергоисточника? Ответ очевиден – в работу, совершаемую машинами и механизмами, используемыми в экономике. Потенциальная энергия энергоисточника переходит в кинетическую энергию, обеспечивая необходимую скорость движения и осуществления производственно-технологических операций в экономике.

В процессе исследования авторами получены аналитические и эмпирические зависимости скорости перемещения людей и грузов в экономике от величины калорийного эквивалента используемого топлива [6, 9].

Так, средняя скорость перемещения людей (км/ч) может быть рассчитана по формуле:

$$v_n = 50,535 \times q^{1,99} \quad (5)$$

Гиперзвуковой самолет Darkstar Top Gun Maverick

Источник: MikeMareen / depositphotos.com



Ни «зеленая сделка», ни Парижское соглашение не изменят направленность этой закономерности. Они лишь могут ускорить или замедлить темпы «движения» плотности энергии по S-образной кривой

Установленная закономерность влияния плотности энергии энергоисточников на среднюю скорость движения в экономике позволяют понять степень воздействия энергетики на формирование новых технологий. Так, например, реализация выражения (5) означает, что при увеличении плотности энергии энергоисточников в 2 раза средняя скорость движения в экономике может возрасти более чем в 3÷4 раза. С ростом скорости движения увеличивается частота производственно-технологических операций. Следовательно, растет производительность труда. Она также может быть увеличена в 3–4 раза. Такой рост производительности труда означает применение новых технологий более высокого уровня. Это весьма значительное влияние плотности энергии энергоисточников, оказываемое на технологическое и экономическое развитие мировой экономики. Конечно же, «игра» в поиск новых источников энергии «стоит свеч» и «больших свеч». Если, например, принять среднюю скорость движения на современных пассажирских поездах равной 150 км/ч, то при увеличении плотности энергии в 2 раза эта скорость должна возрасти не менее чем до 600 км/ч. Такая скорость означает совершенно иной технологический уровень применяемых транспортных систем. Аналогично этому, при средней скорости авиапассажирских перевозок, равной 600–800 км/ч, повышение плотности энергоисточников в 2 раза приведет к увеличению скорости до 2400–3200 км/ч. Конечно, такие скорости движения пока трудно осознать. Однако современный вектор технологического развития гражданской авиации свидетельствует об актуальности разработки и применении гиперзвуковых лайнеров.

Если бы не было «зеленой сделки», то человечество все равно бы «придумало» механизмы, «заставляющие» энергетику более ускоренно повышать плотность энергии энергоисточников

Это – как бы ответ на предложения Р. Бартини, сделанные им еще в начале XX века [6]. Более того, последние испытания гражданских аэрокосмических аппаратов, работающих на субкосмических орбитах Земли, позволяют с большим оптимизмом относиться к реализации подобных проектов пассажирских и грузовых перевозок уже в недалеком будущем. Это, конечно же, значительно расширяет возможности коммуникации и управления удаленными территориями. Направленность на достижение высоких и очень высоких скоростей движения подталкивает к мысли, что в перспективном периоде главной миссией многих стран, по всей видимости, будет экспансия космического пространства [10, 11]. Человечество вместе с неординарным ростом скорости движения все в большей мере будет развивать космические технологии

освоения ближнего, среднего и дальнего космоса. Возможно, одним из базовых направлений выхода из современного кризиса будет ускоренное формирование секторов экономики, нацеленных на реализацию космических технологий. Вероятнее всего, космические проекты уже в ближайшем периоде станут весьма значимым драйвером развития, способным «потянуть» за собой новые эффективные технологии, в том числе технологии чисто гражданского профиля.

Это подкрепляет ранее сформулированный тезис о космосе как уникальной «кладовой» новых технологий. На наш взгляд, такой мировой технологический вектор развития необходимо учитывать в стратегических планах развития российской экономики.

Возможные варианты развития российской энергетики

В это тревожное переломное время важно понять: к какому образу будущего, в том числе, технологическому, необходимо стремиться российской экономике? Какую энергостратегию необходимо закладывать в программные установки Правительства РФ в условиях объявленного разворота на Восток?

В настоящее время, в т. ч. под воздействием возможности такого разворота

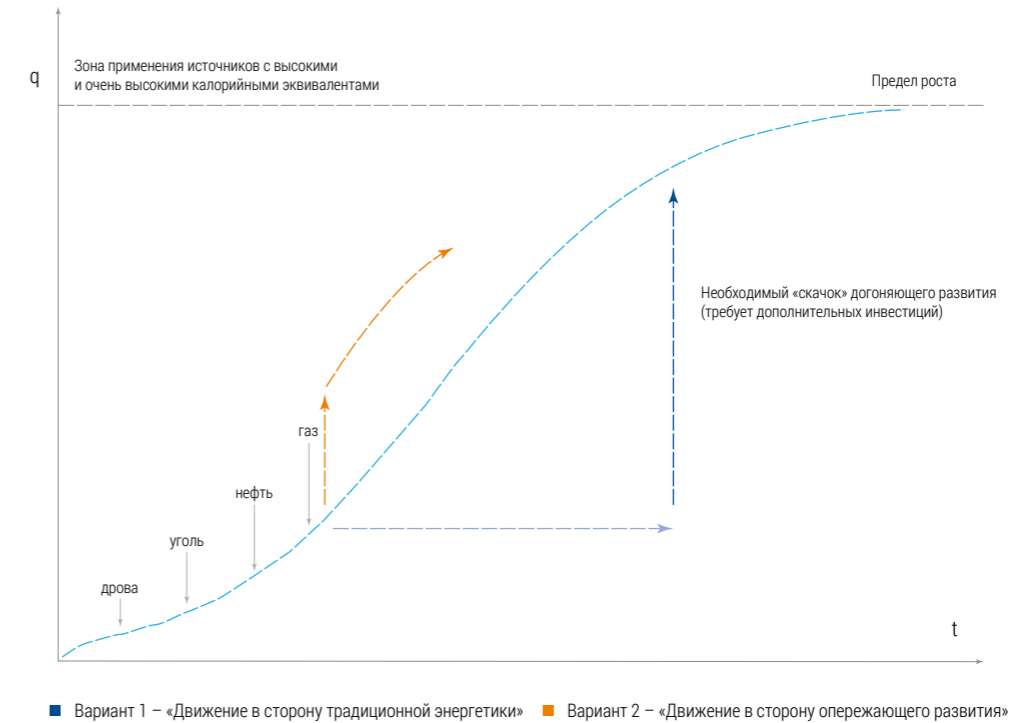


Рис. 4. Варианты развития энергетики России

в общественное сознание во все большей мере насаждается достаточно ироничное отношение к альтернативной энергетике. Традиционные источники энергии (уголь, нефть и газ), запасами которых так богата Россия, провозглашаются самыми эффективными и самыми надежными источниками энергии на многие годы. При этом на высоком уровне провозглашается необходимость перехода к так называемой модели «опережающего» развития российской экономики. Очевидно, предполагается, что она будет «опираться» на традиционную энергетику. Конечно, можно успокоиться, глядя на действительно большие объемы подземных «кладовых» энергоресурсов, можно даже проигнорировать мировые тренды освоения альтернативной энергетики, в т. ч. закономерность перманентного роста плотности энергии энергоисточников, вряд ли получится. Этот рост не зависит от нашего желания, он носит цивилизационный характер. Его отменить нельзя. К нему надо подстраивать и энергетику, и экономику.

Российская энергетика стоит перед выбором: у нее два принципиально возможных варианта развития (рис. 4).

Вариант 1 – «Движение в сторону традиционной энергетики». Этот вариант (го-

ризонтального развития), предполагающий дальнейшее развитие традиционной энергетики путем наращивания инвестиций в разведку и разработку месторождений.

Вариант 2 – «Движение в сторону опережающего развития энергоисточников». Этот вариант (вертикального развития), предусматривающий весьма интенсивное (опережающее) освоение энергетических технологий, основанных на применении источников с высокими и очень высокими плотностями энергии (калорийными эквивалентами).

Если тратить инвестиции, в основном, на горизонтальное движение в сторону традиционной энергетики (вариант 1), то это

Установленная закономерность влияния плотности энергии энергоисточников на среднюю скорость движения в экономике позволяет понять степень воздействия энергетики на создание новых технологий

Земля в космосе

Источник: sdecoret / depositphotos.com





Исторический паровой поезд на угле

Источник: actionphoto50 / depositphotos.com

приведет к консервации роста калорийного эквивалента, и, следовательно, к отсутствию роста производительности труда и применения новых технологий. Это путь технологической деградации экономики, предусматривающий тиражирование старых технологий.

В стратегическом плане он, конечно же, не сможет обеспечить реализацию модели «опережающего» развития экономики. Более того, чем дальше будем идти по этому пути, тем больший будет отрыв от траектории цивилизационного развития глобальной энергетики. В какой-то момент времени все равно придется потратиться на необходимый вертикальный «скачок»

Если тратить инвестиции на горизонтальное движение в сторону традиционной энергетики, то это приведет к консервации роста калорийности, к замедлению развития и внедрения новых технологий

догоняющего развития, приближающий страну к глобальной траектории развития. Реализация такого «скачка» потребует серьезных усилий и значительных инвестиционных затрат. В данном случае можно потратиться дважды – это крайне неэффективный вариант.

Вариант 2 – это ускоренное «движение» в сторону альтернативной энергетики формирующееся за счет применения энергоисточников, обеспечивающих высокую плотность энергии (высокий калорийный эквивалент). Такой вариант развития предполагает высокий уровень инвестиций в новые энергетические технологии. Да, он может обеспечить в стратегическом плане «опережающее развитие экономики», но требует времени и, главное, существенных источников для его реализации.

Конечно же, игнорировать текущий мировой спрос на традиционные энергоносители и наличие значительных запасов углеводородного топлива в стране весьма нецелесообразно. В тактическом плане опора на традиционную энергетику является необходимой. В этой связи вариант 2 тоже мало приемлем для российской экономики.

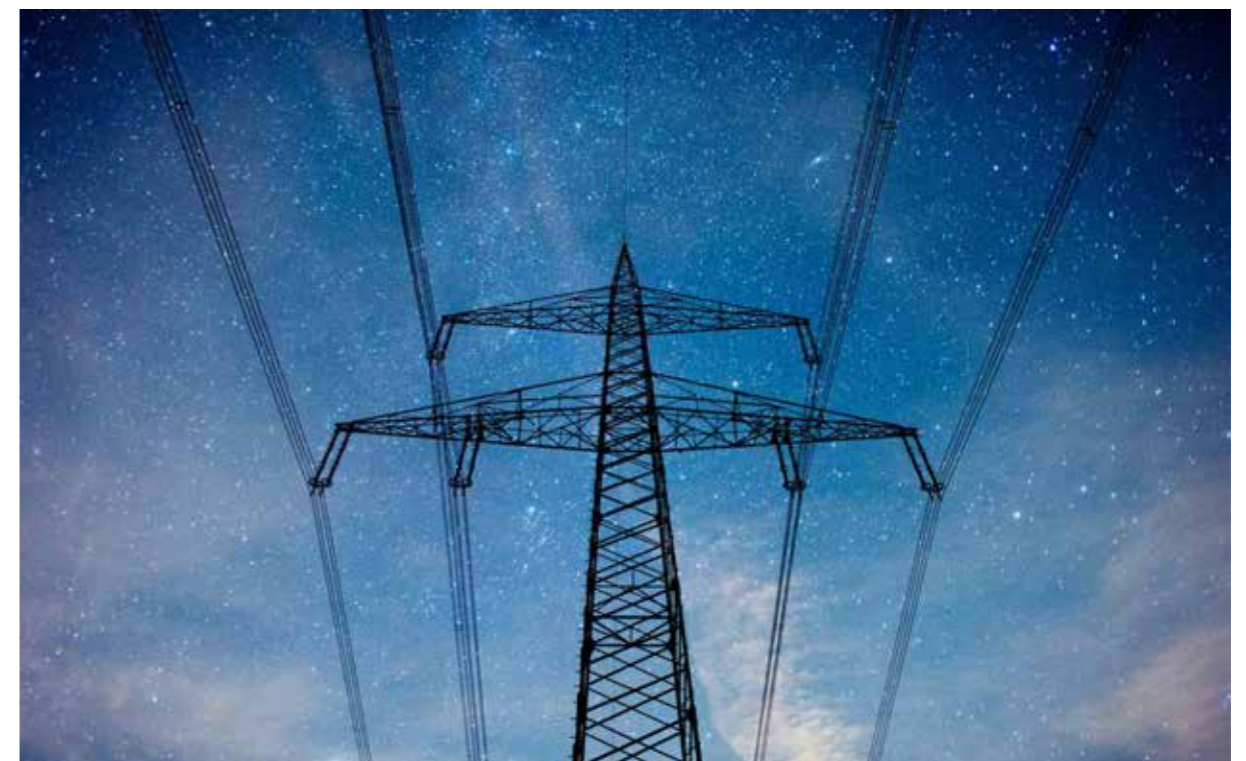
Нам необходим третий вариант – комбинированный. Он предполагает за счет опоры на сектора традиционной энергетики,

на базе ее производственных мощностей, инвестиционных и интеллектуальных ресурсов, осуществление перехода на использование опережающих энергоисточников. Этот вариант предусматривает проведение глубокой целевой реструктуризации традиционной энергетики. Она должна осуществляться на основе целевых индикативных планов по диверсификации производства, контролируемых государством. Не вдаваясь в организационные особенности возможности проведения такой целевой реструктуризации, сошлемся лишь на большой положительный опыт проведения подобных работ в нашей стране. Этот опыт сконцентрирован в успешно реализованной в середине 90-х гг. XX века и начале 2000-х гг. программе реструктуризации угольной промышленности России.

Осуществление в комбинированном варианте развития энергетики работ, подобных проведенным при реструктуризации угольной отрасли, предполагает максимальную нацеленность российской энергетики на соответствие темпам глобального энергоперехода. Как было установлено выше, сутью его является переход от низкокалорийной к высококалорийной энергетике, основанной на иных технических и физических методах генерирования

ЛЭП

Источник: Julian Stratenschulte dpa / all-in.de



Для России необходим вариант, который предусматривает проведение глубокой реструктуризации традиционной энергетики на основе целевых индикативных планов по диверсификации производства

и передачи энергии. Каковы же этапы и периоды этого глобального перехода?

Этапы и периоды реализации глобального энергоперехода

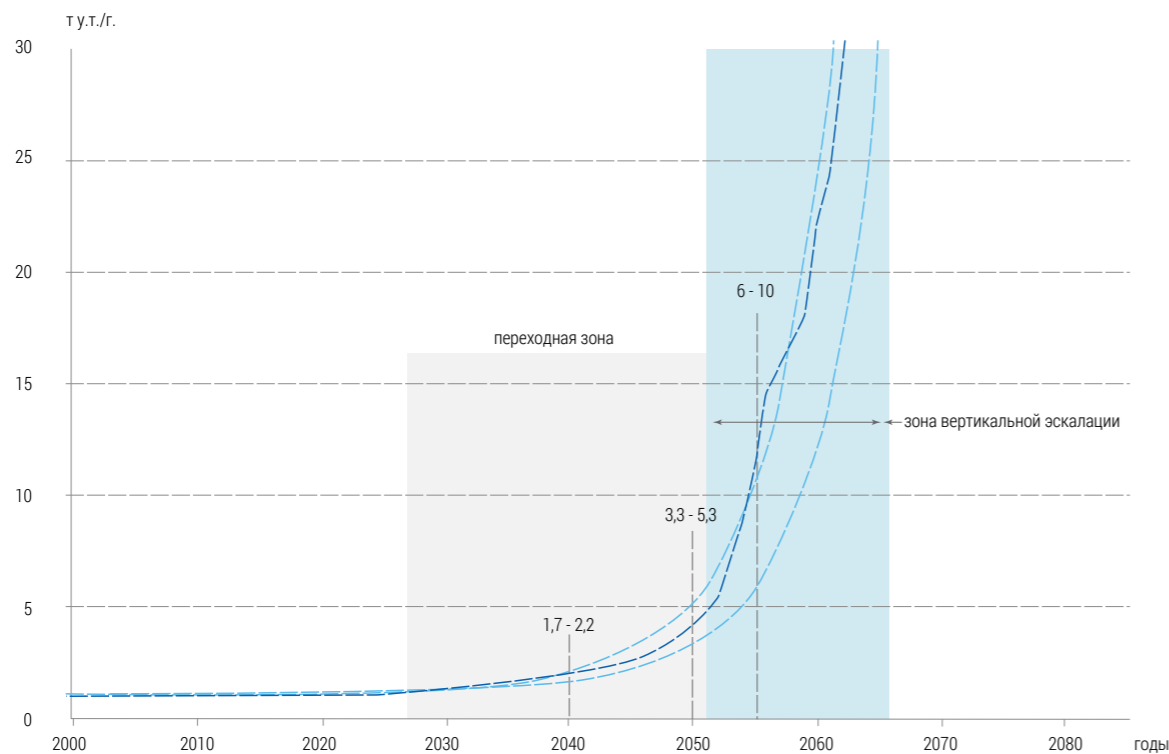
Установленная закономерность S-образного изменения плотности энергии (калорийного эквивалента) довольно сильно упрощает расчеты по формированию прогнозной линейки перспективных значений плотности энергии. Это дает возможность для более достоверной оценки будущего образа глобальной энергетики.

В 2050–2065 гг. калорийный эквивалент может увеличиться в 6–10 раз по сравнению с текущими значениями, далее он может достичь величин, превышающих современный уровень примерно в 30 раз

В процессе исследования нами была получена прогнозная динамика калорийного эквивалента, соответствующая развитию глобальной энергетики в предстоящем периоде XXI века (рис. 5).

В настоящее время средний калорийный эквивалент в глобальной энергетике составляет примерно 1–1,2 т у. т./г. Однако к 2040 г. он, вероятнее всего, увеличится в 2 раза, а к 2050 г. еще, примерно, в 3–5 раз. Как показывают расчеты, за пределами 2050 г. глобальная энергетика будет находиться в зоне вертикальной эскалации роста калорийного эквивалента.

Рис. 5. Прогнозный коридор калорийного эквивалента (переход от низкокалорийной к высококалорийной энергетике)



Так, в период 2050–2065 гг. калорийный эквивалент может сначала увеличиться в 6–10 раз по сравнению со значениями, достигнутыми в настоящем периоде, а далее он может достичь величин, превышающих современный уровень примерно в 30 раз. Начиная с настоящего времени и примерно до 2050 г., глобальная энергетика с большой вероятностью будет находиться в переходной зоне. В ней, скорее всего, будет происходить глубокая ломка всех основных тенденций развития энергетики и, соответственно, осуществляться замена старых технологий на новые. Под воздействием этого процесса, конечно же, будут меняться геополитические, экономические, культурные и нравственные устои существования общества. Уже в настоящее время меняются границы политического и экономического влияния государств. И это все закономерные изменения, диктуемые переходом на иную, более ускоренную ритмику, в т. ч. объясняемую частотой излучения энергии, получаемой из космоса для использования человечеством. Обратим внимание на то, что в ранее представленных прогнозах инновационно-технологического развития (см. рис. 1) пятая промышленная революция охватывает период до 2050 г.

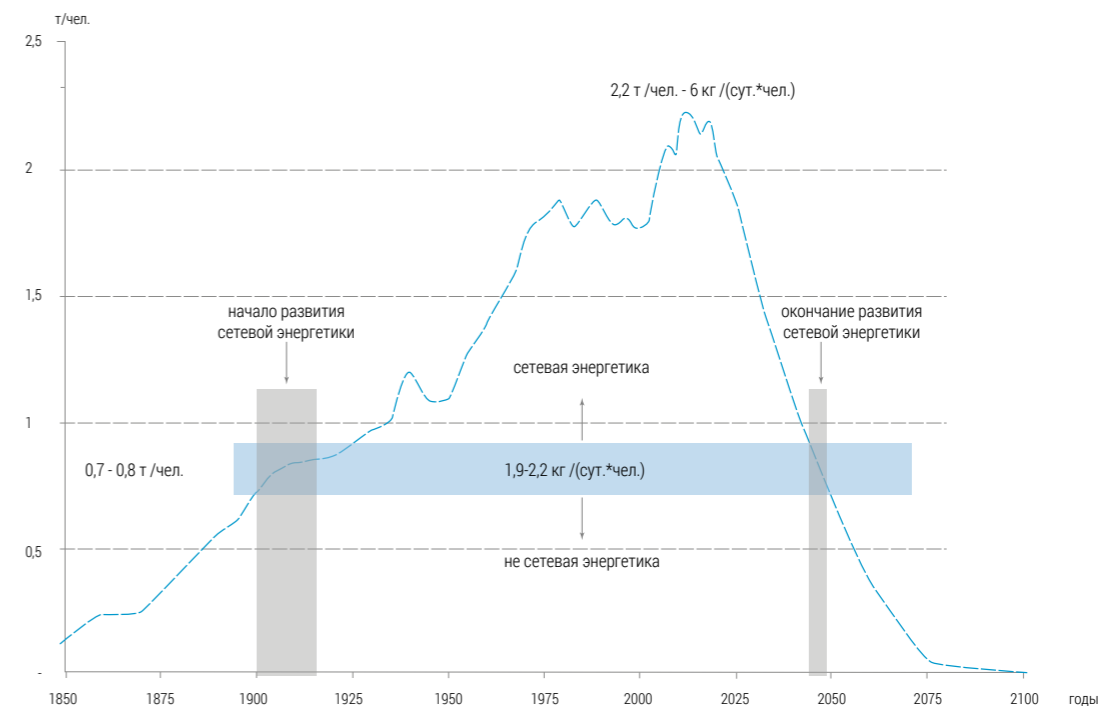


Рис. 6. Душевое потребление массы топлива

[12]. Этот период относится к переходной зоне развития энергетики. Период же 2050–2065 гг., соответствующий реализации шестой промышленной революции, охватывает зону вертикальной эскалации развития энергетики.

По всей видимости, в 2050–2065 гг. при осуществлении вертикальной эскалации произойдет качественный скачок в развитии глобальной энергетики, обеспечивающий революционные технологические преобразования в экономике.

Контурные будущих трансформаций в мировой энергетике

Не претендуя на глубокий анализ возможных путей трансформирования энергетики, определяющих ее будущий образ, отметим, что, по всей вероятности, это будет бессетевая энергетика с минимальным объемом тепловой генерации.

Так, анализ душевого потребления массы топлива показывает, что на протяжении всего цивилизационного периода происходил ее интенсивный рост. Однако, в настоящий период, этот рост уже достиг своего максимума и стал составлять примерно 2 т/чел в год. Приведенное означа-

ет, что каждый человек в мире потребляет примерно 6 кг топлива в сутки. И это максимально достигнутая величина. Она в настоящее время изменяется в сторону уменьшения. В перспективе вследствие применения высококалорийных источников энергии душевое потребление массы топлива будет стремиться к минимальным отметкам (рис. 6).

Отметим, что начало развития сетевой энергетики относится к концу XIX и началу XX века. В этот период в промышленных масштабах стала действовать тепловая генерация электроэнергии. До этого периода душевое потребление массы топлива, как показывают расчеты, составляло менее 0,7–0,8 т/чел в год (или менее 1,9–2,2 кг в сутки). Сетевая энергетика и тепловая генерация появились только тогда, когда душевое потребление стало превышать приведенные значения. Можно полагать, что до этого предела каждый человек, в среднем, мог в таких небольших объемах самостоятельно доставлять для себя необходимое топливо (энергию). Однако дальнейшее развитие экономики заставило увеличить душевое потребление топлива, примерно, в 3 раза — до 6 кг в сутки. Это уже довольно значительные объемы топлива, требующие для доставки к каждому потребителю применения специальных средств

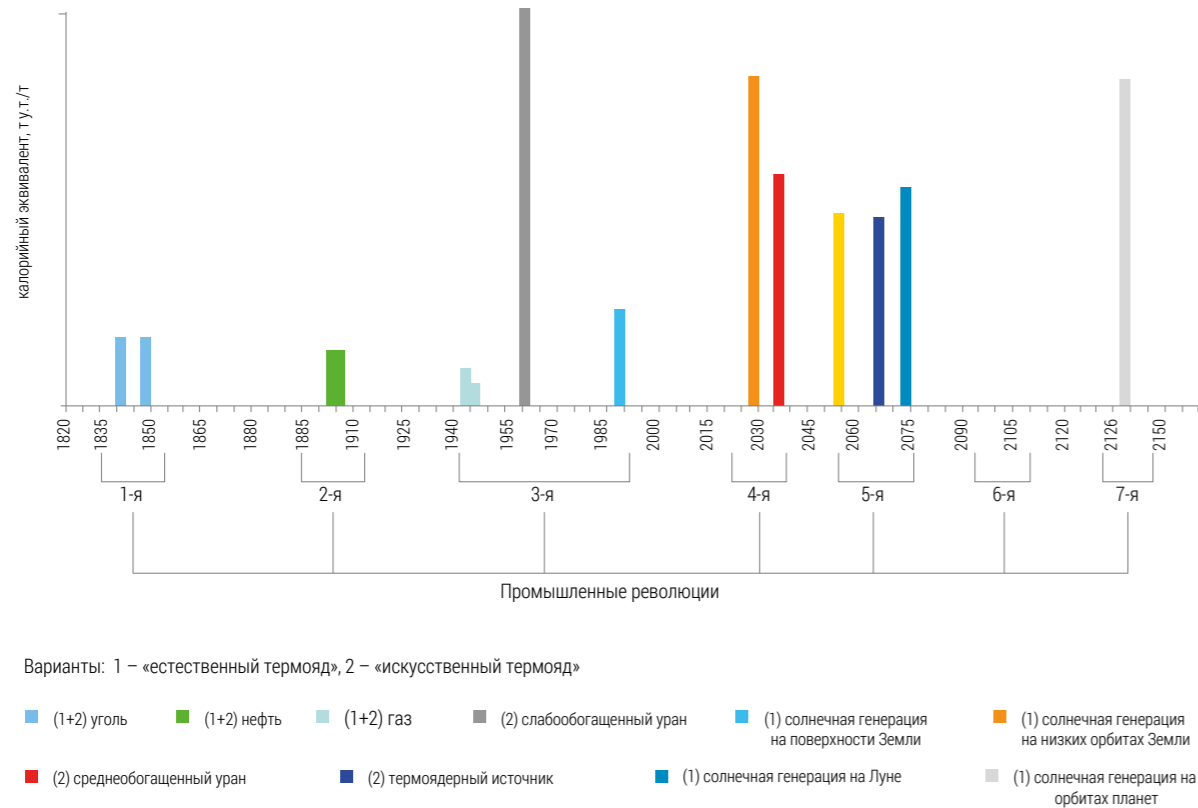


Рис. 7. Последовательность энергетических импульсов при смене энергоисточников и мировых промышленных революций

транспортировки. Можно полагать, что для решения проблемы обеспечения человека необходимой энергией была разработана технология, позволяющая энергию, заключенную в топливе, «перерабатывать» на тепловых электростанциях в электрическую энергию и «спрессовывать» ее до возможности доставки по проводам к каждому потребителю. Конечно же, такое объяснение является весьма схематичным. Однако оно в какой-то мере соответствует логике появления сетевой энергетики, основанной на тепловой генерации. Рост душевого потребления топлива привел к появлению сетевой энергетики и тепловой генерации. Снижение же душевого потребления массы топлива будет способствовать росту источников энергии, обладающих минимальными размерами. При повышении плотности энергии (калорийного эквивалента) энергетика стремится к миниатюризации размеров применяемых энергоисточников.

Будущее энергетики – это, вероятнее всего, топливные элементы малых размеров. Такое построение энергетики, конечно же, будет бессетевым (малосетевым). В ней тепловая генерация, по всей видимо-

сти, будет занимать минимальные объемы. Прогнозные оценки душевого потребления топлива свидетельствуют о том, что падение объемов его потребления до граничных значений, т. е. 1,9–2,2 кг в сутки, наступит, примерно, к 2050 г., т. е. при вхождении в зону вертикальной эскалации.

Выше приведенное означает, что в этой зоне развития энергетики должно произойти ее преобразование в энергетiku нового типа, основанное на бессетевой форме передачи энергии. В зоне вертикальной эскалации тепловая генерация вряд ли будет иметь какое-то существенное значение. Энергетика, вероятнее всего, станет развиваться на иных принципах генерации [7, 13].

Не претендуя на полный охват применения новых технологий, нами был разработан концептуальный подход определения контура будущего энергетики, основанного на сопоставлении прогнозных значений калорийных эквивалентов (на S-образной кривой) и частот излучения энергоисточников, с частотами различных видов излучения электромагнитных волн [6, 9].

С учетом действующей классификации видов излучений установлено, что последо-

вательный переход от одного вида излучения к другому сопровождается «скачком» роста его частоты. Эти «скачки» частоты излучения характеризуют величину энергетических импульсов и отражают пошаговый переход к энергоисточникам с большей плотностью энергии (калорийным эквивалентом). Установлено [6], что такие импульсы приурочены к соответствующим промышленным революциям (рис. 7).

Полученная ретроспективная и прогнозная динамика энергетических импульсов позволили, на основе сопоставления обеспечиваемых ими видов излучений типам излучений возможных источников энергии, определить контуры будущего изменения энергетических технологий. Как показывают расчеты, период 2030–2040 гг., по всей вероятности, будет связан с началом применения низкоорбитальной солнечной энергетики с системой станций, обеспечивающих не только электроснабжение отдельных регионов Земли, но и электрообеспечение аэрокосмических аппаратов и дронов различного назначения.

По всей видимости, в этот же период начнется серийное производство реакторов на быстрых нейтронах IV поколения, а также безопасных реакторов небольших размеров вплоть до малых ядерных топливных элементов.

В период 2060–2075 гг., вероятно, начнется использование систем солнечной энергетики на геостационарной орбите Земли, а затем – развертывание таких систем на поверхности Луны. По всей видимости, в этот же период может начаться промышленное использование гибридных ядерно-термоядерных установок и челове-

В 2050-2065 гг. при вертикальной эскалации произойдет качественный скачок в развитии глобальной энергетики, обеспечивающий революционные технологические преобразования в экономике

чество вплотную приблизится к использованию энергии термоядерного синтеза.

Выше приведенные контуры будущего развития энергетики символизируют два возможных маршрута движения энергетических технологий (рис. 6). Первый маршрут (1) – это движение энергетики в космос для приближения к естественному источнику энергии термоядерного синтеза – Солнцу. Второй маршрут (2) олицетворяет движение к использованию искусственного источника термоядерной энергии, т. е. к «Солнцу на Земле». По сути, человек всю историю цивилизационного развития всегда шел и продолжает «идти за Солнцем».

Приведенные энергетические технологии позволяют обеспечить в период (2050–2065 гг.) вертикальной эскалации калорийного эквивалента технологический «рывок», преобразующий не только всю производственно-хозяйственную сферу деятельности человека, но и возможно будущую геополитическую и экономическую картинку мира.

Использованные источники

- Капица С. П., Курдюмов С. П., Малинецкий Г. Г. Синергетика и прогнозы будущего, 4-е изд., испр. и доп. М.: URSS, 2019.
- Моделирование и прогнозирование мировой динамики – развитие и совершенствование методов анализа и математического моделирования различных аспектов мировой динамики / В. А. Садовничий, А. А. Акаев, А. В. Коротаев, С. Ю. Малков. М.: ИСПИ ФНИСЦ, 2012.
- World Intellectual Property Organization. URL: <https://www.wipo.int/portal/en/index.html> [Дата обращения: 12.05.2023].
- Статистическая база данных Всемирной организации интеллектуальной собственности. URL: <https://www3.wipo.int/ipstats/index.htm?tab=patent> [Дата обращения: 01.05.2020].
- Статистическая база ВР [Дата обращения: 12.05.2023].
- Бушуев В. В., Клепач А. Н. На пути к космопланетарной цивилизации // Коллективная монография – М.: ИД «Энергия». 2023–688 с. DOI: 10.5281/zenodo.7684441 EDN: YQGWFC.
- Тесла Н. Дневники. Я могу объяснить многое / Пер. С. Ивановича. М.: Яуза-пресс, 2018. С. 268. ISBN 978-5-9955-0989-9.
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Теория поля. 7-е изд., испр. Т. II. М.: Наука, 1988. С. 158–159. ISBN 5-02-014420-7.
- Плакиткин Ю. А., Плакиткина Л. С. Энергия и прогнозы мирового развития: тенденции и закономерности // М. Издательский дом МЭИ. 2020. – 220 с. ISBN: 978-5-383-01436-3.
- Хокинг С. Названы сроки миграции людей на другие планеты // Российская газета. 21 июня 2017 г.
- Хокинг С. Человечеству необходимо найти планету для выживания // Российская газета. 21 мая 2017 г.
- Норицгугу У. «Общество 5.0»: взгляд Mitsubishi Electric // Экономические стратегии. 2017. № 4.
- Тесла Н. Власть над миром / Пер. Л. Бабушкиной. М.: Алгоритм, 2018. С. 205. ISBN 978-5-906995-87-2.

Энергетика беспилотных авиационных систем

Power engineering of unmanned aircraft systems

Дмитрий ХОЛКИН

Директор АНО «Центр энергетических систем будущего «Энерджинет»
E-mail: dvh@internetofenergy.ru

Игорь ЧАУСОВ

Руководитель аналитического направления АНО «Центр энергетических систем будущего «Энерджинет»
E-mail: chi@internetofenergy.ru

Анна ШУРАНОВА

Ведущий аналитик АНО «Центр энергетических систем будущего «Энерджинет», стажёр-исследователь научно-учебной лаборатории экономики изменения климата ФМЭИМП НИУ ВШЭ
E-mail: ashuranova@hse.ru

Dmitry KHOLKIN

Deputy leader (co-head) of the EnergyNet working group, Director of the Center for Future Energy Systems «EnergyNet»
E-mail: dvh@internetofenergy.ru

Igor CHAUSOV

Head of Analytic Branch of the Center for Future Energy Systems «EnergyNet»
E-mail: chi@internetofenergy.ru

Anna SHURANOVA

Lead Analyst of the Center for Future Energy Systems «EnergyNet», Research Intern of the Laboratory for Economics of Climate Change at the HSE University
E-mail: ashuranova@hse.ru

Использование солнечных панелей на БВС

Источник: wired.com



Аннотация. Беспилотные воздушные суда (БВС), особенно малых классов, набирают популярность в гражданских сферах применения и формируют быстро растущий мировой рынок. В связи с этим актуализируется вопрос нахождения такого источника энергии для них, который обеспечивал бы максимальное время полёта при минимальном увеличении массы и объёма самого БВС. Выделяются три ключевых типа энергоснабжения БВС будущего, альтернативные распространённым сейчас двигателям: аккумуляторные батареи, фотоэлектрические модули и водородные топливные элементы. Рассматривается использование гибридных источников энергии как основная тенденция развития энергетики БВС. Анализируются два фронтальных технологических направления в этой сфере: увеличение плотности мощности для аккумуляторов и повышение плотности давления в баллонах для хранения водорода. Делается вывод о том, что для России именно эти направления должны стать определяющими в развитии технологий энергоснабжения БВС.

Ключевые слова: беспилотные воздушные суда, аккумуляторные батареи, фотоэлектрические системы, водородные топливные элементы, подзарядка методом подкачки, беспроводная лазерная подзарядка, привязные БВС, водородные баллоны.

Abstract. Unmanned aerial vehicles (UAVs), especially of the smaller classes, are becoming increasingly applicable for civil purposes and are forming a rapidly growing market. This brings forward the problem of finding such a way to fuel them that would ensure maximum flight range without significant increase in UAV weight and size. We discern three such ways which constitute an alternative to present-day engines and will be determinant in supplying UAVs in the future: batteries, photovoltaic systems, and fuel cells. We also consider hybridization as one of the key trends in UAV energy of the future. With regard to the latter, we also analyze two frontier technological tendencies: the enhancement of power density in batteries and of pressure – in hydrogen storage tanks. We conclude that these should become determinant directions of Russia's policy in terms of UAV energy supply.

Keywords: unmanned aerial vehicles, batteries, photovoltaic systems, fuel cells, swapping, wireless power transfer, tethering, hydrogen storage tanks.

//

Для БВС наиболее распространено использование газотурбинных двигателей, двигателей внутреннего сгорания и электродвигателей

В настоящее время наметился устойчивый рост спроса на беспилотные авиационные системы и беспилотные воздушные суда (БВС) для специальных, гражданских и коммерческих сфер применения. Актуальный размер этого рынка составляет, по разным оценкам, от консервативных 12,5 млрд долл. до оптимистичных 26,2 млрд долл. в год, а к 2030 г. он может вырасти до 52,3–77,7 млрд долл. в год [1]. Прорыв в сфере БВС возник в результате достижений в области микропроцессоров и искусственного интеллекта, а также в результате появления новых мобильных источников энергии, позволяющих создавать интеллектуальные беспилотники с низкой стоимостью и высокой мобильностью. Постольку поскольку в России в последнее время, в том числе в рамках Национальной технологической инициативы, активно развивается данное направление работ, то рассмотрим энергетические аспекты БВС.

Категория	Масса, кг	Дальность полёта, км	Высота полёта, м	Длительность полёта, ч
Микро-БВС	<5	<10	250	1
Мини-БВС	<20/25/30/150	<10	150/250/300	<2
Тактические БВС	25–1500	10–500+	3000–9000	2–48
Стратегические БВС	2500–5000+	>2000	20000–30000+	24–48+
БВС специального назначения	150–1000+	<1500	50–12000	2–4+

Таблица 1. Категории БВС в зависимости от массы, дальности полёта и иных характеристик

Источник: Kimon P. Valavanis, George J. Vachtsevanos. *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Springer Dordrecht, 2014. URL: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>

Сферы применения БВС включают доставку грузов [2], сельское хозяйство [3], мониторинг дорожного движения [4], инфраструктурных объектов, в т. ч. электросетей [5], состояния окружающей среды [6], обеспечения беспроводного покрытия мобильных сетей [7], военные цели и т. д. Кроме того, БВС можно различать по классам и категориям в зависимости от их массы и дальности полёта (таблица 1) [8].

БВС, используемые для доставки на большие расстояния тяжелых грузов, а также в военных целях, имеющие значительную взлётную массу и дальность полёта, скорее можно отнести к малой авиации. Данный сегмент беспилотников имеет уже значительную историю и отработанные решения. Однако, в последнее время стали массово применяться микро- и мини-БВС, энергетические решения для которых еще находятся на стадии становления. Далее мы изучим особенности энергоснабжения таких БВС, частично также затрагивая аппараты специального назначения. Эта тема представляется актуальной в свете значительного потенциала их применения в российских реалиях и необходимости составления чёткого представления о том, какие решения будут релевантны в ближайшие годы с учётом тенденций энергоперехода и развития новейших энергетических технологий.

Двигатели БВС

Для БВС наиболее распространено использование газотурбинных двигателей, двигателей внутреннего сгорания и электродвигателей.

Газотурбинные двигатели, используемые в силовых установках летательных аппаратов, демонстрируют хорошие характеристики только в диапазоне высокой мощности (более 100 л. с.) и не подходят для применения в малых БВС, поскольку

отличаются низкими показателями экономии топлива и эффективности при высоком уровне шума.

Широкое распространение получили двигатели внутреннего сгорания (ДВС) и электродвигатели. По сравнению с электродвигателем, ДВС способен обеспечивать большую длительность полёта и дальность полезной нагрузки, благодаря более высокой мощности и топливной экономичности. Однако электродвигатели остаются предпочтительными для малых БВС вследствие наличия таких ключевых характеристик, как:

- низкие тепловые и акустические характеристики (сложнее обнаружить тепловым радаром);
- хорошо развитые электронные системы управления;
- низкая стоимость;
- более высокая надёжность и меньшая взрывоопасность [9].

Военный беспилотник

Источник: [estebande / depositphotos.com](https://www.depositphotos.com/estebande)

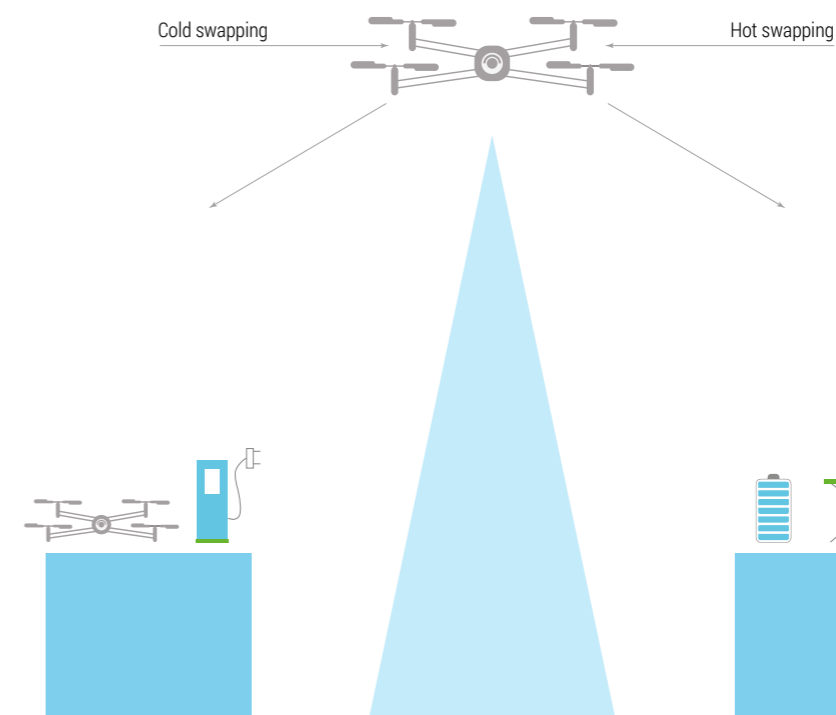


Рис. 1. Подзарядка методом подкачки

Источник: [14]

В настоящее время электродвигатели являются самым распространённым решением для малых БВС, источниками энергии для которых обычно являются электрические аккумуляторы, фотоэлектрические модули, топливные элементы.

Аккумуляторные батареи

Большинство небольших БВС, особенно квадрокоптеров, работают на батарейных системах. Решения на базе аккумуляторов способны закрыть основные потребности гражданского сегмента в плане длительности полёта, стоимости и гибкости. Наибольшее время полёта (до 1,5 ч) обеспечивают литий-полимерные аккумуляторы, которые, к примеру, для микро-беспилотников весят менее 2 кг. Также применяются литий-ионные, никель-кадмиевые, никель-марганцевые, литий-серные, свинцово-кислотные и иные накопители. Эти аккумуляторы уступают литий-полимерным по плотности энергии, экономии массы и другим характеристикам [10].

Недостатками аккумуляторного типа энергоснабжения являются ограничения по накопленному запасу энергии, что значительно сужает время функционирования БВС. Для устранения этой проблемы и обеспечения возможности выполнять длительные миссии используется несколько реше-

ний, связанных с различными способами подзарядки аккумуляторов БВС [11].

Так, подзарядка аккумуляторных БВС методом подкачки может проводиться средствами либо холодной подкачки, либо горячей замены (рис. 1) [12]. Оба этих способа предполагают посадку БВС на наземную зарядную станцию, но при холодной подкачке аккумулятор БВС подключается к зарядке, и сам аппарат остаётся на месте на всю продолжительность этого процесса, а при горячей замене разряженный аккумулятор извлекается из продолжающего работать БВС, и на его место устанавливается полностью заряженный, заранее подготовленный на станции [13].

Наибольшее время полёта (до 1,5 ч) обеспечивают литий-полимерные аккумуляторы весом менее 2 кг. Также применяются литий-ионные, никель-кадмиевые, никель-марганцевые и иные накопители

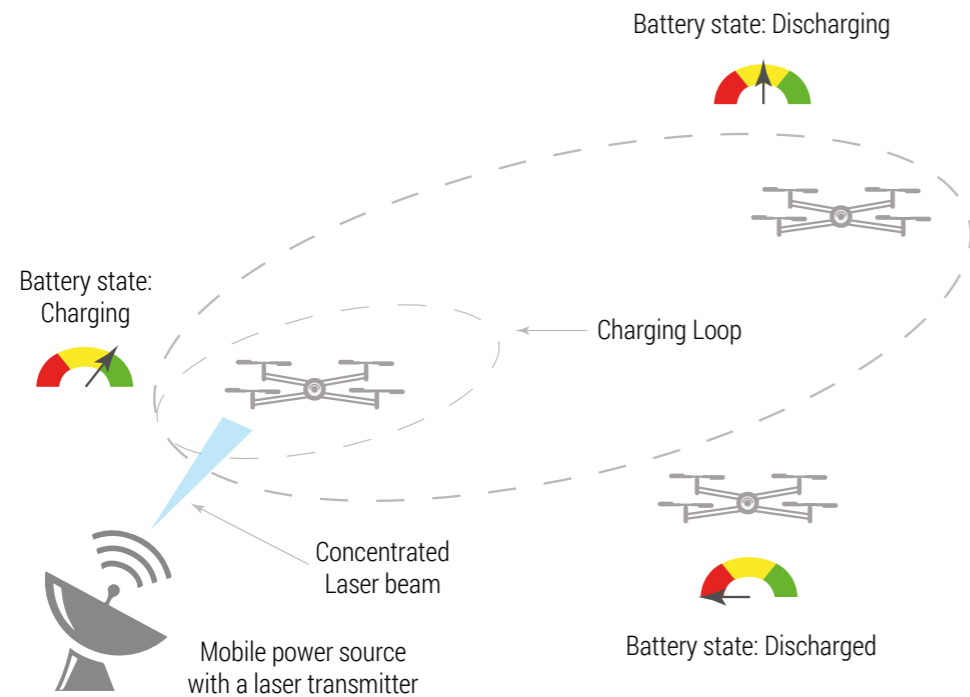


Рис. 2. Беспроводная лазерная подзарядка

Источник: [16]

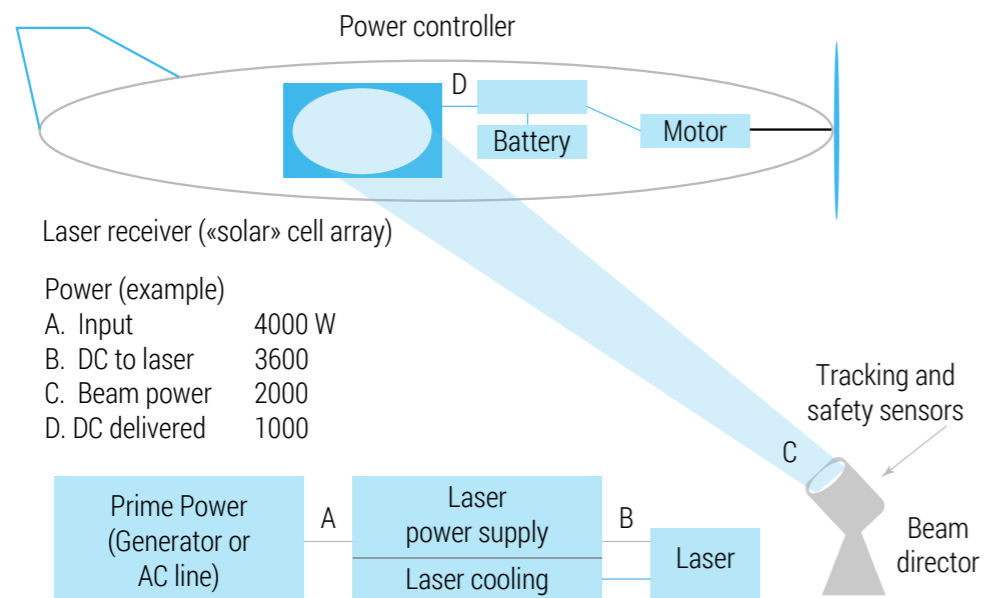


Рис. 3. Привязной БВС

Таким образом, при расположении зарядных станций вдоль траектории движения БВС появляется возможность обеспечения длительного времени полёта, но существуют определённые риски безопасности аппаратов при взлёте со станций и посадке на них. Эти риски устраняются при использовании беспроводной лазерной подзарядки (рис. 2), которая, однако, ограничивает расстояние и высоту полёта зоной вокруг радиуса распространения светового луча, передаваемого лазерным генератором на наземной станции [15].

Наконец, для решения задач на ограниченной местности полезны привязные БВС (рис. 3), преимущество которых состоит в неограниченной автономии и возможности увеличения полезной нагрузки

- сложность системы, приобретаемая вследствие необходимости установки на БВС преобразователей, контроллеров, сенсоров и иного оборудования;
- непостоянный характер выработки энергии от солнечной радиации;
- непригодность для малых БВС, во многом из-за потребности в максимизации размеров крыла для того, чтобы на них можно было расположить достаточное количество фотоэлектрических модулей.

Топливные элементы

Беспилотные воздушные суда, использующие водородные топливные элементы,



Рис. 4. БВС на топливных элементах

Источник: [22]

за счёт отсутствия необходимости установки источника или накопителя энергии непосредственно на аппарат [17].

Фотоэлектрические модули

Низкоуглеродной опцией для энергообеспечения БВС является установка модулей солнечной генерации непосредственно на аппараты так, чтобы энергия солнца могла обеспечивать полёт в течение периодов максимальной солнечной активности, а аккумуляторы с накопленной в эти периоды энергией – в отсутствие инсоляции [18]. Такая система увеличивает время полёта и в определённых условиях может даже сделать его неограниченным. Однако и она имеет такие ограничения, как [19]:

могут работать в течение нескольких часов вместо нескольких минут у аккумуляторных БВС (рис. 4). Топливные элементы превосходят батареи по удельной мощности, поэтому их следует рассматривать как предпочтительное решение для обеспечения большей «выносливости» при ограниченной массе [20]. Кроме того, процесс дозаправки осуществляется практически мгновенно, что снимает проблему простоя БВС, а энергопотери при передаче энергии сокращаются [21].

Тем не менее, при применении топливных элементов существует несколько негативных факторов, которые необходимо учитывать [23]:

- водород имеет плотность всего 0,089 кг/м³ при стандартной температуре и давлении – соответствен-



Рис. 5. Российский гибридный БВС ZALA 421–16E5G продемонстрировал полёт на 12 часов, расстояние более 1130 км

Источник: [25]

но, чтобы БВС мог перевозить достаточное количество топлива, баки должны быть очень громоздкими;

- нестабильность напряжения при возникновении резких изменений в мощности;
- более низкая эффективность (60 %), чем у литий-ионных батарей (90 %);
- необходимость установки дополнительного оборудования, усложняющая систему.

Тенденции развития систем энергоснабжения БВС

Гибридизация выделяется как наиболее перспективная архитектура для осуществления энергопитания беспилотных воздушных судов. Такой подход позволит сочетать преимущества и характеристики различных источников энергии и уравновешивать их ограничения. Мощность должна быть оптимально распределена между источниками для достижения эффективного энергопотребления и обеспечения высокопроизводительной работы источников питания при максимально возможном продлении срока их службы.

Так, объединение топливного элемента с батареями для формирования гибридной

системы энергоснабжения представляется вариантом, который позволит двигательной установке БВС воспользоваться преимуществами обоих источников и сбалансировать их недостатки. Батарея в этом случае может использоваться в периоды пиковой нагрузки (взлёта и набора высоты), т. к. имеет более высокую эффективность и плотность мощности, а также не подвержена нестабильности напряжения. Топливный элемент, в свою очередь, может быть основным источником во время полёта и заправки [24]. Также батареи либо топливные элементы могут быть объединены с любой другой энергетической установкой. Тем не менее, гибридные

Газотурбинные двигатели, используемые в силовых установках летательных аппаратов, демонстрируют хорошие характеристики только в диапазоне более 100 л. с. и не подходят для малых БВС

Сейчас электродвигатели являются самым распространённым решением для малых БВС, источниками энергии для них являются электрические аккумуляторы, фотоэлектрические модули, топливные элементы

варианты электроснабжения БВС требуют установки систем управления энергопотреблением (контроллеры и инверторы), которые дополнительно увеличивают массу и сложность устройства.

Кроме того, на уровне теоретических и практических моделей и прототипов разрабатываются БВС с гибридными установками, включающими суперконденсаторы [26]. Суперконденсаторы имеют невысокую стоимость установки и обслуживания, более широкий разброс температур, при которых они могут функционировать, а также устойчивы к перегрузкам и не склонны к нестабильности напряжения в полёте [27].

Важную роль в развитии энергоснабжения БВС будут играть не только бортовые системы, но и зарядная инфраструктура для аккумуляторных дронов, являющихся в настоящее время наиболее распространённым их типом. Соответственно, возникает проблематика строительства такой инфраструктуры и её интеграции в электрические сети, которая вызовет дополнительную нагрузку на них [28]. В ряде случаев зарядные станции могут работать автономно при помощи ВИЭ (например, установленных на них фотоэлектрических систем) и накопителей энергии. Некоторые исследования предлагают объединение соответствующей инфраструктуры для БВС и электротранспорта с тем, чтобы беспилотники могли использовать в т. ч. существующие зарядные станции электромобилей [29]. Отдельной проблемой является пространственное расположение зарядных станций с учётом особенностей городской и сельской местности [30]. В случае зарядки методом подкачки возникает необходимость расположения зарядных станций вдоль траектории движения БВС, т. е. с достаточно высокой частотой распределения на местности. Это связано с тем, что аппараты могут запускаться по самым разным маршрутам. Поскольку

Проект БВС на водородных топливных элементах

Источник: uacrussia.livejournal.com



Гибридные варианты электроснабжения БВС требуют установки систем управления энергопотреблением (контроллеры и инверторы), которые дополнительно увеличивают массу и сложность устройства

размер таких станций компактен, их можно размещать на крышах зданий, столбах, светофорах и т. п. Здания рассматриваются как перспективные места и для расположения станций беспроводной лазерной подзарядки [31]. Альтернативными вариантами могут служить башни или вышки. Вследствие недостаточной развитости технологий автоматизации метода подкачки его использование в ряде случаев предполагает присутствие человека, а также может оказаться сложным и аварийно опасным. Беспроводные же варианты подзарядки считаются более безопасными как для самих БВС, так и для их операторов [32].

Наконец, по мере перехода к гибридным архитектурам БВС и появления территориально распределенной зарядной инфраструктуры повышается значимость управления энергопотреблением. Оно позволяет сочетать преимущества и характеристики различных источников питания и уравнивать их ограничения. Мощность должна быть оптимально распределена между источниками для достижения эффективного энергопотребления и обеспечения высокопроизводительной работы источников питания при максимально возможном продлении длительности их работы. Таким образом, должна быть внедрена система управления энергопотреблением для распределения мощности в режиме реального времени между доступными источниками с учетом таких ограничений, как эффективность, быстрая реакция, расход топлива, требуемая мощность и условия полета.

Ключевые технологические задачи в сфере энергетики для БВС в России

По результатам анализа тенденций в развитии энергетики БВС можно сделать несколько выводов.

Управление БВС

Источник: Stas_K / depositphotos.com

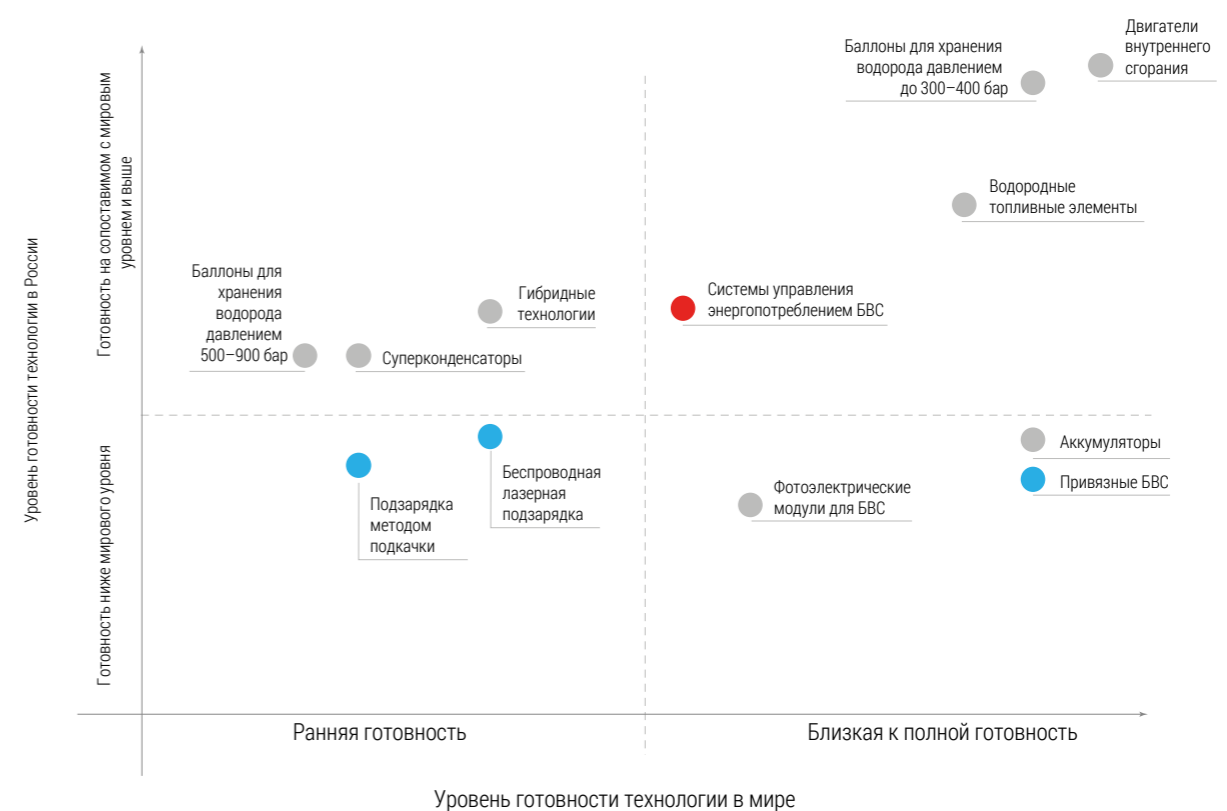


Рис. 6. Состояние развития технологий энергоснабжения БВС в мире и в России

Во-первых, для всех основных выделенных типов источников энергии существуют фронтальные технологические направления, недостаточный уровень развития которых будет сдерживать их переход к массовому использованию и коммерциализацию. Для БВС на водородных топливных элементах такой первостепенной задачей является повышение давления в баллонах для хранения водорода, что позволит увеличить его количество при сохранении объема и, таким образом, продлить дальность полета аппарата. С этой же целью в аккумуляторных БВС приоритетным направлением является увеличение плотности мощности. Параллельно должна развиваться и инфраструктура подзарядки, которая будет наиболее актуальна для микро- и малых БВС, неспособных переносить тяжелые аккумуляторы. Наконец, для фотоэлектрических систем ключевой задачей представляется развитие в сторону гибридизации, в первую очередь с накопителями энергии, и совершенствование

интеллектуальных систем управления энергопотреблением, которые позволят наиболее эффективно использовать потенциал солнечной энергии с целью увеличения автономности БВС.

Во-вторых, число конкретных прикладных направлений, в которых БВС востребованы в российском гражданском сегменте, велико и ранжируется от мониторинга обширных и протяженных инфраструктур

По мере перехода к гибридным архитектурам беспилотных воздушных средств и появления территориально распределенной зарядной инфраструктуры повышается значимость управления энергопотреблением

турных объектов (электрических сетей, строительных и нефтегазовых объектов) и сельскохозяйственных территорий до использования в науке (картографирование, изучение природных явлений, наблюдение за лесными массивами и ледниками) и коммерческих целях (логистика, реклама) [33]. Вне зависимости от цели применения БВС их экономическая целесообразность зависит от двух ключевых параметров – запаса хода и времени барражирования – которые, в свою очередь, определяются именно характеристиками источника энергии аппарата.

Рис. 6 демонстрирует состояние развития основных рассмотренных технологий энергоснабжения БВС в мире и в России. Очевидно, что некоторые технологии – например, водород и компрессионные баллоны – являются одними из наиболее перспективных для страны в технологической гонке на будущее, т. к. ещё достаточно слабо распространены по миру, но имеют большой накопленный отечественный задел.

Принимая во внимание данные факты, можно заключить, что в России с учётом имеющегося научно-технического и ресурсного потенциала перспективно разрабатывать и развивать следующие технологии в сфере энергоснабжения БВС:

- компрессия водорода и баллоны для его хранения, в т. ч. создание новых композитных материалов для них;
- аккумуляторы, в особенности литий-серные и постлитиевые, а также их развитие в части повышения плотности мощности;

- полная автоматизация и роботизация систем подзарядки малых БВС, которые станут одним из важных элементов сетевой инфраструктуры будущего;
- системы интеллектуального управления энергопотреблением БВС – поиск наиболее эффективных конфигураций различных источников и оптимизация процессов их работы в зависимости от режима полёта, условий окружающей среды и т. п.

В то время как эти технологии имеют наибольшие перспективы, развитие энергоснабжения БВС в России не может ограничиваться исключительно ими, поскольку обеспечение технологического суверенитета, в особенности в таком значимом направлении, должно носить более комплексный характер. В условиях ограниченного санкционными мерами доступа к зарубежным технологиям представляется приоритетным налаживание импортозамещения и развитие отечественных наукоёмких производств, в первую очередь по тем решениям энергоснабжения БВС, где отставание от мирового уровня значительно – аккумуляторным системам и методам их подзарядки, а также фотоэлектрическим модулям.

БВС – сравнительно новая, особенно для России, область практики со стремительно растущим спросом в гражданском и военном секторах, и многие вопросы энергоснабжения БВС и создания соответствующей инфраструктуры требуют детального исследования.

Использованные источники

1. *Unmanned Aerial Vehicle Market By Product (Small UAV, Tactical and Strategic UAV), By Point of Sale (Aftermarket, OEM), By Technology, By System, By Wing Type, By Application, By End-Use, and By Region Forecast to 2030.* – URL: <https://www.emergenresearch.com/industry-report/unmanned-aerial-vehicle-market>; *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market by Type, Application, and Weight: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2030.* – URL: <https://www.alliedmarketresearch.com/unmanned-aerial-vehicle-market-A09059>; *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market Research Report Information – Market Forecast Till 2030.* – URL: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/unmanned-aerial-vehicle-uav-market-806>; *Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Market – Global Industry Assessment and Forecast.* – URL: <https://www.vantagemarketresearch.com/industry-report/unmanned-aerial-vehicle-uav-market-2086>
2. H. Shakhathreh, A. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha, Z. Dou, E. Almaita, I. Khalil, N. S. Othman, A. Khreishah, M. Guizani, *Unmanned Aerial Vehicles: A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges*, arXiv:1805.00881 [cs] (Apr. 2018). arXiv:1805.00881.
3. G. Potrino, N. Palmieri, V. Antonello, A. Serianni, *Drones support in precision agriculture for fighting against parasites*, in: 2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR), IEEE, 2018, pp. 1-4 (2018).
4. R. Ke, Z. Li, S. Kim, J. Ash, Z. Cui, Y. Wang, *Real-time bidirectional traffic flow parameter estimation from aerial videos*, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 18 (4) (2017) 890(901) (2017).
5. Z. Zhou, C. Zhang, C. Xu, F. Xiong, Y. Zhang, T. Umer, *Energy-efficient industrial internet of uavs for power line inspection in smart grid*, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14 (6) (2018) 2705(2714) (2018).
6. T. Villa, F. Gonzalez, B. Milijevic, Z. Ristovski, L. Morawska, *An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives*, *Sensors* 16 (7) (2016) 1072 (2016).

7. Caizhi Zhang, Yuqi Qiu, Jiawei Chen, Yuehua Li, Zhitao Liu, Yang Liu, Jiujuan Zhang, Chan Siew Hwa. *A comprehensive review of electrochemical hybrid power supply systems and intelligent energy managements for unmanned aerial vehicles in public services // Energy and AI Volume 9, August 2022, 100175.*
8. *Примечание: количество и особенности классов и категорий могут значительно отличаться в разных научных исследованиях. Например, альтернативные классификации приводит НАТО (URL: https://www.japcc.org/wp-content/uploads/UAS_CONEMP.pdf), Н. Элмсейри и др. (URL: <http://dx.doi.org/10.3390/aerospace8120363>) и т. д.*
9. Mohamed Nadir Boukoberine, Zhibin Zhou, Mohamed Benbouzid. *A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects // Applied Energy Volume 255, 1 December 2019, 113823.*
10. Shehu, I.A., Mohammed, M., Sulaiman, S.H., Abdulkarim, A., Alhassan, A.B. (2021). *A Review on Unmanned Aerial Vehicle Energy Sources and Management.* In: Abawajy, J.H., Choo, K.K.R., Chiroma, H. (eds) *International Conference on Emerging Applications and Technologies for Industry 4.0 (EATI'2020)*. EATI 2020. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 254. Springer, Cham.
11. Ibid.
12. Jacobsen, R., Ruhe, N., Dornback, N.: *Autonomous UAV Battery Swapping (2018)*
13. Liu, Z.-N., et al.: *QUADO: an autonomous recharge system for quadcopter.* In: 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM). IEEE (2017).
14. Dhaval Joshi, Dipankar Deb, S. M Muyeen. *Comprehensive Review on Electric Propulsion System of Unmanned Aerial Vehicles // Front. Energy Res. Volume 10 – 2022 752012.*
15. Shehu, I.A., Mohammed, M., Sulaiman, S.H., Abdulkarim, A., Alhassan, A.B. (2021). *A Review... Op. cit.*
16. Xu, J., Zeng, Y., Zhang, R.: *UAV-enabled wireless power transfer: trajectory design and energy optimization.* *IEEE Trans. Wireless Commun.* 17(8), 5092–5106 (2018).
17. Mohamed Nadir Boukoberine, Zhibin Zhou, Mohamed Benbouzid. *A critical review... Op. cit.*
18. Mohamed Nadir Boukoberine, Zhibin Zhou, Mohamed Benbouzid. *A critical review... Op. cit.*
19. Vega-Garita, V., et al.: *Integrating a photovoltaic storage system in one device: a critical review.* *Progr. Photovol. Res. Appl.* 27(4), 346–370 (2019).
20. Hakan Ucgun, Ugur Yuzgec, Metin Kesler, Cagri Cicekdemir. *The Comparison of Energy Sources Used in Unmanned Air Vehicles // International journal of scientific and technological research. Vol 5, No 6 (2019).*
21. Gong, A., et al.: *Analysis of a fuel-cell/battery/supercapacitor hybrid propulsion system for a UAV using a hardware-in-the-loop flight simulator.* In: 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). IEEE (2018).
22. Hakan Ucgun, Ugur Yuzgec, Metin Kesler, Cagri Cicekdemir. *The Comparison... Op. cit.*
23. Mohamed Nadir Boukoberine, Zhibin Zhou, Mohamed Benbouzid. *A critical review... Op. cit.*
24. Ibid.
25. J. J. Cooley, P. Lindahl, C. L. Zimmerman, M. Cornachione, G. Jordan, S. R. Shaw, S. B. Leeb, *Multiconverter system design for fuel cell bu_ering and diagnostics under uav load profiles, IEEE Transactions on Power Electronics* 29 (6) (2014) 3232(3244) (2014).
26. *The First Hybrid UAV ZALA Performed Flight Izhevsk – Yoshkar-Ola – Izhevsk.* – URL: <https://www.armadainternational.com/2021/09/the-first-hybrid-uav-zala-performed-flight-izhevsk-yoshkar-ola-izhevsk/>
27. Ashleigh Townsend, Immanuel N. Jiya, Christiaan Martinson, Dmitri Bessarabov, Rupert Gouws. *A comprehensive review of energy sources for unmanned aerial vehicles, their shortfalls and opportunities for improvements // Heliyon* 6 (2020) e05285; H. Wang, Q. Wang, B. Hu, *A review of developments in energy storage systems for hybrid excavators, Automation in Construction* 80 (2017) 1–10 (2017).
28. Jiageng Ruan, Paul David Walker, Nong Zhang, Jinglai Wu. *An investigation of hybrid energy storage system in multi-speed electric vehicle // Energy Volume 140, Part 1, 1 December 2017, Pages 291-306.*
29. Boris Galkin, Jacek KibiŃda, and Luiz A. DaSilva. *UAVs as Mobile Infrastructure: Addressing Battery*
30. *Lifetime.* arXiv:1807.00996.
31. Yujie Qin, Mustafa A. Kishk. *Performance Analysis of Charging Infrastructure Sharing in UAV and EV-involved Networks.* arXiv:2208.06782.
32. Bacanlı, Salih Safa, Enas Elgeldawi, Begümhan Turgut, and Damla Turgut. 2022. *UAV Charging Station Placement in Opportunistic Networks // Drones* 6, no. 10: 293.
33. Raciti, Angelo & Rizzo, Santi & Susinni, Giovanni. (2018). *Drone Charging Stations over the Buildings Based on a Wireless Power Transfer System // Conference: Industrial and Commercial Power SystemsAt: Niagara Falls, ON, Canada.*
34. Bacanlı, Salih Safa, Enas Elgeldawi, Begümhan Turgut, and Damla Turgut. 2022. *UAV Charging Station Placement... Op. cit.*
35. Аникаева А. Д., Мартюшев Д. А. *Оценка потенциала применения беспилотных летательных аппаратов в нефтегазовой отрасли // Недропользование. 2020. Т. 20. №4. С. 344–355; Вторый В. Ф., Вторый С. Ф. Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных аппаратов // АгроЭкоИнженерия. 2017. №92. С. 158–165; Матюха С. В. Беспилотные авиационные системы в грузоперевозках // Транспортное дело России. 2022. №1. С. 141–143; Просвирина Н. В. Анализ и перспективы развития беспилотных летательных аппаратов // Московский экономический журнал. 2021. №10. С. 560–575.*

Российский рассольный литий: проблемы и возможности

Russian brine lithium: problems and opportunities

Айрат АРИФУЛЛИН
Аналитик, «ВЫГОН Консалтинг»
E-mail: aarifullin@vygon.consulting

Airat ARIFULLIN
Analyst, VYGON Consulting
E-mail: aarifullin@vygon.consulting

Егор ЗАРУБА
Аналитик, «ВЫГОН Консалтинг»
E-mail: ezaruba@vygon.consulting

Egor ZARUBA
Analyst, VYGON Consulting
E-mail: ezaruba@vygon.consulting

Пластовые рассолы Ковыктинского месторождения содержат литий

Источник: «Газпром»



Аннотация. В статье рассматриваются предпосылки и условия для развития добычи рассольного лития на нефтегазовых промыслах РФ. Анализируется мировой спрос на электромобили и аккумуляторы, производители которых выступают ключевым потребителем литиевого сырья. Рассматриваются геологические особенности залежей рассольного лития и различные методики оценки запасов. Особое внимание авторы уделяют вопросу постановки запасов на государственный баланс и необходимости гармонизации российской классификации ресурсов с международными для реализации экспортного потенциала отечественной литиевой индустрии. В статье также подсвечивается проблема поиска оптимальной для РФ технологии для добычи и переработки литийсодержащего сырья. Авторы приводят оценку экономики российских проектов по добыче рассольного лития на пробуренных нефтегазовых скважинах и делают вывод о перспективах России на глобальном рынке этого ключевого сырья экономики будущего.

Ключевые слова: энергетический переход, ресурсы лития, подсчет запасов, сорбционный метод, гидроминеральное сырье.

Abstract. Prerequisites and conditions for the development of brine lithium production in the oil and gas fields of the Russian Federation are considered in the article. An analysis of the global demand for electric vehicles and batteries is provided, the manufacturers of which are the key consumer of lithium raw materials. The geological features of brine lithium deposits and various methods for estimating reserves are considered. The authors pay special attention to the issue of putting reserves on the state balance sheet and the need to harmonize the Russian classification of resources with international ones in order to realize the export potential of the domestic lithium industry. The article also highlights the problem of finding the optimal technology for the extraction and processing of lithium-containing raw materials for the Russian Federation. The authors assess the economics of Russian projects for the extraction of lithium brine from drilled oil and gas wells and draw a conclusion about the prospects for Russia in the global market of this key raw material for the economy of the future.

Keywords: energy transition, lithium resources, reserve estimation, sorption method, hydromineral raw materials.

Спрос на литий

Мировой энергетический переход, направленный на использование возобновляемых источников энергии, стимулирует рост интереса к электромобильям. Это, в свою очередь, приводит к увеличению спроса на литий, который является ключевым сырьем для производства аккумуляторов электрокаров.

Большинство стран Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) планируют достичь доли электрокаров в продаже автомобилей на уровне 100 %. Некоторые страны Европейского союза, Великобритания, Канада, Япония и Чили намерены достичь этой цели к 2035 г. Нидерланды, Австрия, Ирландия, Израиль и Исландия планируют это сделать к 2030 г., а Норвегия даже к 2025 г.

Согласно прогнозу «ВЫГОН Консалтинг», по вероятному сценарию развития

//

К 2030 г. внутренний спрос на литий в России вырастет более чем в два раза, но при этом составит менее 1 % от мирового рынка

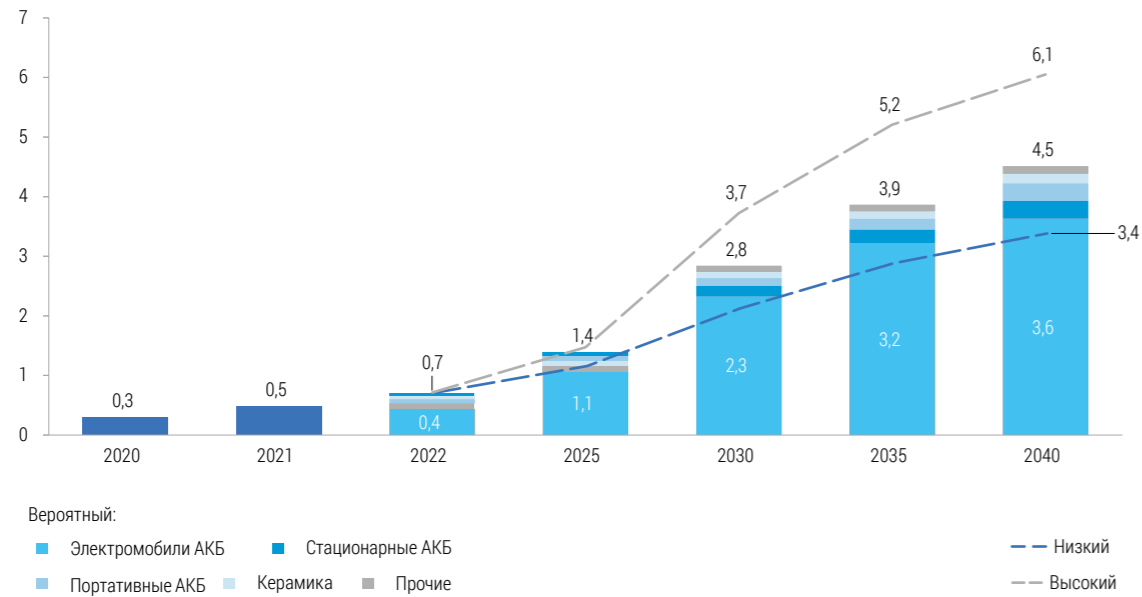


Рис. 1. Прогноз спроса на литий, млн т LCE [1]

Источник: «ВЫГОН Консалтинг»

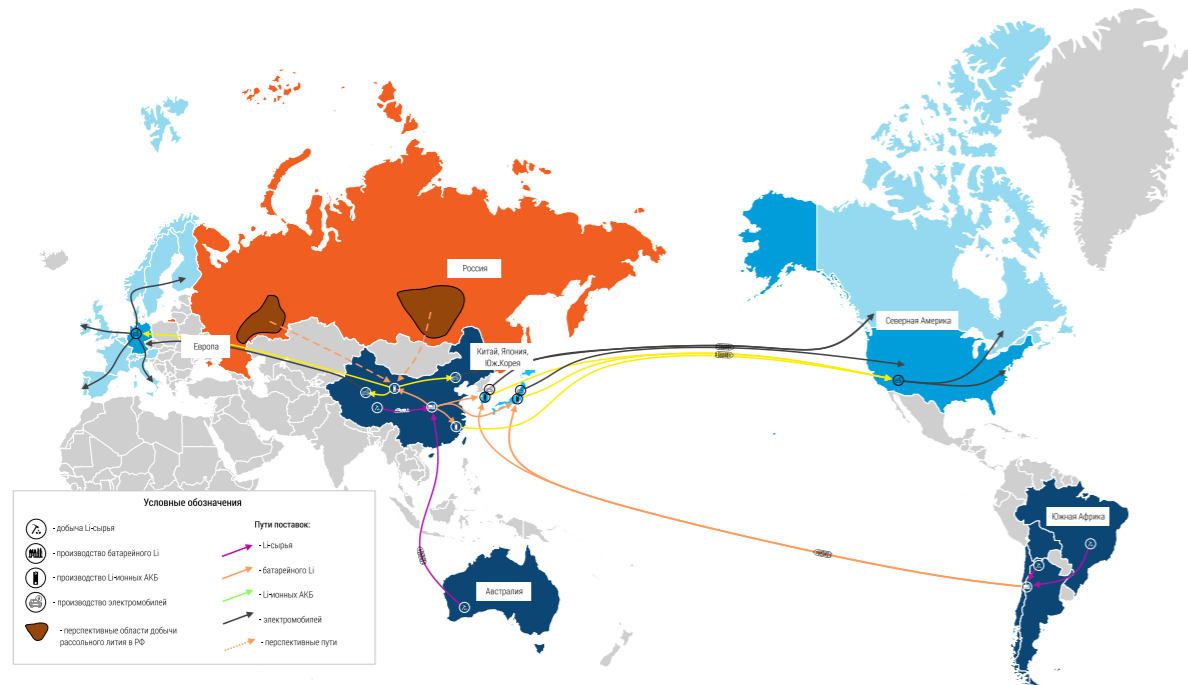


Рис. 2. Мировые производственные цепочки в сфере добычи лития и производства электромобилей

Источник: «ВЫГОН Консалтинг»

рынка к 2040 г. доля продаж электрокаров составит около 57 % от общего числа автомобилей (с 10,5 млн штук в прошлом году до 58,9 млн шт.) [1]. Спрос стимулируется через субсидирование покупки электромобилей и развитие соответствующей электрозаправочной инфраструктуры.

По нашим расчётам, для удовлетворения мирового спроса на литий со стороны производителей аккумуляторов и других потребителей необходимо около 4,5 млн т эквивалента карбоната лития (LCE). С учетом текущего и планируемого предложения, такой объем может оказаться недостаточным для удовлетворения растущего спроса. Это создает возможности для стран с большим литиевым ресурсным потенциалом, в том числе для России (рис. 1).

Сегодня мировые ресурсы лития преимущественно сосредоточены в «литиевом треугольнике» Южной Америки (60 %), Австралии (9 %) и Китае (8 %), в то время как Россия обладает 1 % от мировых ресурсов (по данным геологической службы США, учитывавшей только рудный литий). Добываемый в Южной Америке и Австралии литий поставляется, преимущественно, в три ключевых страны-потребителей этого металла: Китай, Японию и Южную Корею

По нашим расчётам, для удовлетворения мирового спроса на литий со стороны производителей аккумуляторов и других потребителей необходимо около 4,5 млн т эквивалента карбоната лития

(рис. 2). В данных странах литий используется в производстве литий-ионных аккумуляторных батарей для электротранспорта. Китай сегодня является ведущим игроком на рынке электромобильных АКБ, потребляя более 56 % мировой добычи.

Сбыт электрокаров сосредоточен в странах Европы и Северной Америки, а также в странах АТР. Учитывая геополитическую обстановку, расположение литиевых провинций и ключевую роль Китая в этой сфере – наиболее перспективным является сбыт отечественной литиевой продукции именно в Поднебесную.

Электромобили в Китае

Источник: technologyforyou.org



Литиевые рассолы России и подсчет запасов

Российские рассолоносные бассейны с промышленными концентрациями лития находятся в пределах древних Восточно-Европейской и Сибирской платформ. Литиевые рассолы также были обнаружены и на более молодых территориях Предкавказья [2], где высокоминерализованные воды встречаются в Терско-Кумском артезианском бассейне. Согласно проведенному нами анализу геологических предпосылок и данных пробуренных скважин основные перспективные зоны распространения лития на отечественных нефтегазовых месторождениях находятся в Лено-Тунгусской, Волго-Уральской и Северо-Кавказской провинциях (рис. 3).

Итогом происходивших в этих регионах геологических процессов стало формирование крайне солёных рассолов с высокими концентрациями лития. Эти залежи могут быть как массивными, так литологически и тектонически ограниченными системами.

Сложность залежи также может характеризоваться ее многофазностью (агрегатным состоянием вещества – рассол, пластовая вода, нефть, газ и т. д.) и многокомпонентностью (наличием разных элементов внутри одной фазы). Это важно учитывать для корректного определения границ залежи и возможности получения постоянного притока высоко минерализованной пластовой воды, питающей месторождение. Сложность геологического строения оказывает фундаментальное влияние на подсчет объемов рассольного лития.

Вопрос оценки запасов и ресурсов гидроминеральных рассолов в России до сих пор является недостаточно проработанным. Сейчас оценка запасов литиеносных подземных вод основана главным образом на гидродинамическом методе. При использовании этого метода производится расчет дебита водозабора на предполагаемый период эксплуатации, при условии, что снижение уровня воды в эксплуатационных скважинах не превысит установленное

Рис. 3. Карта-схема перспектив использования гидроминеральных ресурсов лития в РФ [1]

Источник:
«ВЫГОН Консалтинг»



Условные обозначения:

- геологические объемы рассольного лития категорий Proved+Probable;
- геологические объемы рассольного лития категории Possible;
- границы крупных нефтегазоносных провинций;
- данные исследования пластовых вод скважин (цифра - содержание Li^+ в мг/л);
- месторождения углеводородов.



Рис. 4. Структура мировых ресурсов лития по странам с учетом рассольных ресурсов РФ, млн т LCE [1]

Источник:
«ВЫГОН Консалтинг»

ограничение. На основе геометрии водоносного горизонта, концентрации интересующих элементов, прогнозных дебитов и расстояния от эксплуатационных скважин определяются категории ресурсов и запасы гидроминерального сырья.

Большая часть запасов мировых рассольных проектов, в том числе Salar de Atacama (Чили), Hombre Muerto (Аргентина), Salar de Olaroz (Аргентина), Rincon Lithium Brine (Аргентина), оценена объемным методом. Он основан на учете таких показателей, как площадь и толщина залежи, ее открытая пористость, водонасыщенность, минерализация и прочих физико-химических параметрах. В дополнение к объемному методу зарубежные производители лития для перевода ресурсов в запасы используют вышеупомянутые цифровые гидродина-

мические модели учета гидрогеологии и водного баланса. По сути, такая комплексная методика идентична оценке запасов углеводородного сырья.

Оценка ресурсов российского рассольного лития в исследовании «ВЫГОН Консалтинг» [1] была проведена объемным методом. Они сопоставимы с ресурсами мировых литиеносных лидеров (Боливия, Аргентина) и составляют около 108 млн т LCE (рис. 4). Однако изученность рассольного лития в России крайне низкая, что создаёт огромный разброс в исходных подсчетных параметрах. Поэтому необходимо расширять геологическую и промышленную базу данных литиевых рассолов для повышения степени достоверности запасов и ресурсов этого вида сырья. В частности, необходимо бурение поисково-разведочных скважин, проведение геофизических исследований и геологического моделирования.

По состоянию на июнь 2023 г. подсчет и постановка на баланс запасов лития в рассолах России не проводились. Для этого процесса применима «Классификация запасов и прогнозных ресурсов теплоэнергетических и промышленных подземных вод» Минприроды России [3]. В соответствии с этим документом основным критерием для постановки запасов на баланс является экономическая эффективность в текущих макроэкономических и налоговых реалиях. По предварительным оценкам «ВЫГОН Консалтинг», стоимость

Мировые ресурсы лития преимущественно сосредоточены в «литиевом треугольнике» Южной Америки (60%), Австралии (9%) и Китае (8%), в то время как Россия обладает 1% от мировых ресурсов

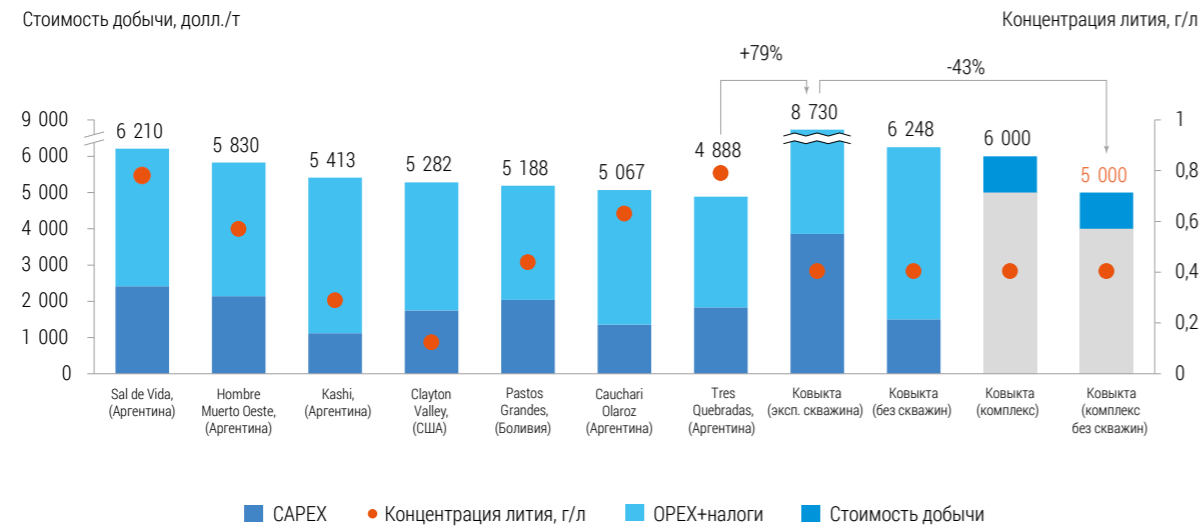


Рис. 5. Сравнение стоимости добычи рассольного лития по проектам, стартующим в 2022–2030 гг., долл./т LCE [1]

Источник:
«ВЫГОН Консалтинг»

добычи российского рассольного лития минимум в пять раз меньше рыночной цены на карбонат лития (при цене 43,5 тыс. долл./т LCE) (рис. 5). Таким образом, сегодня существуют все предпосылки для активизации работы с литиевой ресурсной базой в РФ.

Помимо решения задачи постановки на государственный баланс нужно принимать во внимание вопрос гармонизации классификации российских запасов рассольного лития с международными требованиями. Это обусловлено экспортным потенциалом отечественной литиевой промышленности. По нашим оценкам, к 2030 г. внутренний спрос на литий в России вырастет более чем в два раза, но при этом составит менее 1 % мирового рынка. При этом наша страна способна прокормить до 15 % мирового спроса к 2040 г. (рис. 6).

С учетом перспектив возможного литиевого партнёрства России и Китая необходима гармонизация отечественной классификации запасов и ресурсов гидроминерального сырья с международными классификациями, признанными азиатскими фондовыми биржами. В частности, с кодексом CRIRSCO, объединяющим в себе систему признанных национальных кодексов по подсчёту запасов. Принимая во внимание, что Россия уже имеет опыт гармонизации с данной классификацией в области твердых полезных ископаемых (ТПИ) [4], распространение принятых подходов возможно и для рассольного лития.

Технологии добычи и переработки

Еще одной проблемой на пути развития масштабной литиевой индустрии в РФ является отсутствие готовой технологии переработки литийсодержащего сырья.

Одной из физико-химических характеристик для оценки свойств рассольного лития используется показатель R, который представляет собой отношение концентрации суммы ионов Ca и Mg к концентрации лития в рассоле. Показатель R является определяющим для разработки технологии получения соединений лития из рассолов и существенно влияет на экономические аспекты процесса.

Литиеносное гидроминеральное сырье (ЛГМС), которое встречается в России и на северо-западе Китая, содержит

Дефицит на рынке лития в 2022 г. может нивелироваться вводом новых мощностей в ближайшие годы. Это приведет к снижению цен на литиевый карбонат с 64 до 35 тыс. долл./т к 2040 г.

По оптимистичному сценарию к 2040 г. Россия может покрыть более половины дефицита на мировом рынке лития. Ежегодная выручка наших производителей может достигнуть около 20 млрд долл.

высокие концентрации магния и кальция (с показателем $R > 100$). Согласно классификации Ю. И. Остроушко (проведена на основе химического состава рассола в 1960 г.) [5], рассолы сибирской платформы относятся к третьему классу рассолов, т. е. к рассолам хлоридного кальциевого типа с концентрацией ионов лития 100–350 и выше при значении $R=200–1700$. Такое сырье не может быть переработано с использованием радиационной галургической технологии (выпаривание), применяемой в странах «Литиевого треугольника».

Основным критерием, определяющим выбор технологического решения для получения солей лития, является минеральный состав, представляющий собой разнообразные солевые системы. Существующие

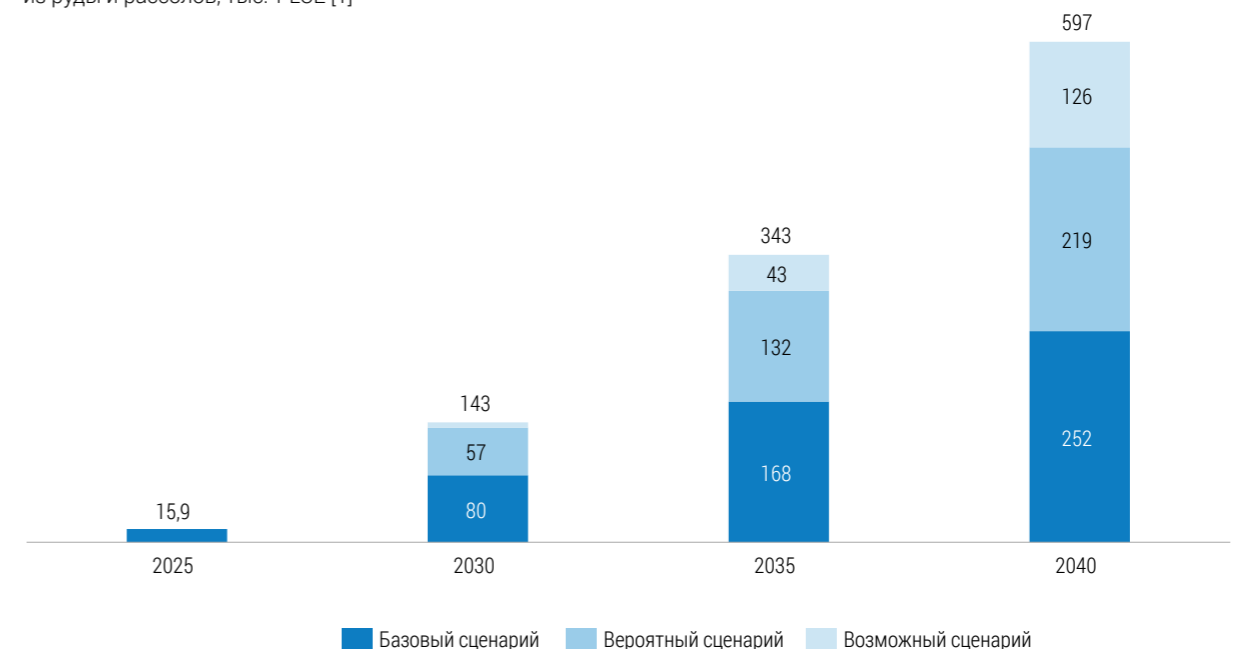
технологические методы очистки рассолов от щелочноземельных металлов и магния (химические, ионообменные) применимы только если суммарная концентрация щелочноземельных металлов и магния по отношению к литию не превышает $R=100$ [6]. Поэтому единственным методом извлечения лития из рассолов с высоким показателем R является сорбционный метод.

На данный момент эта технология переработки высококонцентрированных рассолов за рубежом находится на стадии опытно-промышленных испытаний. Сорбент на основе алюминия был использован китайскими учеными при проведении испытаний по селективному извлечению лития из хлоридных рассолов ($R=93$), и показал стабильный результат по величине степени извлечения лития около 80 %. В России же пока идут только лабораторные эксперименты. Они показали [7–9] эффективность применения как органических сорбентов на основе катионообменных смол, так и неорганических гранулированных – ДГАЛ на основе алюминия, сорбентов на основе оксидов марганца или оксидов марганца и алюминия в водородной форме.

По мнению Вахромеева А. Г. [6], применение сорбционных процессов с использованием селективных сорбентов для ионов лития позволяет получать элюаты (растворы хлорида лития с примесями хлоридов Mg и Ca) с низким показателем R. Это, в свою

Рис. 6. Сценарий прогноза добычи лития в России из руды и рассолов, тыс. т LCE [1]

Источник: «ВЫГОН Консалтинг»



очередь, открывает возможности для использования технологических методов, применяемых в промышленной практике Аргентины, Чили и США для переработки рассолов с низким показателем R – таких как концентрирование, химическое осаждение примесей и получение малорастворимого карбоната лития.

При этом надо отметить, что Россия обладает потенциалом производства собственных установок по переработке гидроминерального лития в готовую литийсодержащую продукцию (карбонат лития, гидроксид лития). Технологическая схема установки извлечения лития сорбирующим методом состоит из сорбционно-десорбционных колонн, выпаривателей, микроволновых и трубчатых блочных печей, резервуаров и емкостей различного назначения. Каждый отдельный элемент такой установки производится в России для нужд нефте- и газоперерабатывающей и химической промышленности.

Что касается добычи, то здесь также есть ряд проблемных моментов:

1. Закачка отработанной воды с минерализацией меньше исходной пластовой при наличии в коллекторе глинистых минералов может привести к набуханию глин, снижению приемистости нагнетательных скважин, а также общему ухудшению фильтрационно-емкостных свойств пласта.
2. Изменение термобарических условий может привести к выпадению солей в призабойной, устьевой частях скважины или ее стволе.
3. Возникновение коррозии вследствие добычи коррозионно активной минерализованной пластовой воды.

Помимо решения задачи постановки на государственный баланс нужно принимать во внимание вопрос гармонизации классификации российских запасов рассольного лития с международными требованиями



Литий-ионные батареи
Источник: nstu.ru

Для решения возможных технологических проблем потребуются исследование особенностей фильтрации многокомпонентной высокоминерализованной пластовой воды как в поровом, так и в скважинном пространстве, принципов ионного обмена при контакте в системе «рассол – порода» для создания цифровой модели разработки подобных залежей.

Перспективы российского лития

Инвестиционный период проектов по добыче лития сопоставим с проектами нефтегазовой отрасли и составляет более 10 лет. Однако, этот период может быть сокращен до 5–7 лет в случае реализации проекта на действующих нефтегазовых месторождениях с готовой инфраструктурой (эксплуатируемые скважины) и хорошей изученностью недр (при разведке на УВС сразу определяется наличие иных полезных компонентов, включая литий).

По оценке «ВЫГОН Консалтинг», в нашей стране при комплексной добыче компонентов (лития и других минералов, например, брома, йода, марганца) из рассолов из ранее пробуренных нефтегазовых скважин стоимость производства становится ниже или сопоставимой с ключевыми проектами в Южной Америке – 4–5 тыс. долл./т и 4,9–6,2 тыс. долл./т соответственно. Это делает российский

литий конкурентоспособным на мировом рынке. Такие же условия (готовая нефтегазовая инфраструктура и комплексная добыча других минералов) обеспечивают снижение себестоимости российских рассольных проектов относительно зарубежных рудных – 4–5 тыс. долл./т против 4,9–7,7 тыс. долл./т.

Недостаток предложения 2022 г. на рынке лития может нивелироваться вводом новых мощностей в ближайшие годы. Это приведет к снижению цен на литиевый карбонат с текущих 64 до 35 тыс. долл./т к 2040 г. При цене продажи в 35 тыс. долл./т LCE и себестоимости в 4–5 тыс. долл./т LCE российские проекты по добыче лития останутся высоко rentable.

По оптимистичному сценарию «ВЫГОН Консалтинг» к 2040 г. Россия может покрыть более половины вероятного дефицита на мировом рынке лития, составляющего 1,1 млн т LCE. В результате ежегодная выручка наших производителей может составить в оптимистичном сценарии около 20 млрд долл., причем из этого объема на добычу рассольного лития нефтегазовыми компаниями может прийти около 75 % (13 млрд долл.). В результате по экспортным доходам отечественная литиевая отрасль может занять 5-е место, обойдя черные металлы, уголь и пшеницу.

Для масштабного развертывания литиевой добычи на нефтегазовых месторождениях в условиях отсутствия отечественного промышленного опыта необходимо опробовать различные технологические решения на пилотных проектах. Причем «пилоты»

Ресурсы российского рассольного лития сопоставимы с ресурсами мировых литиевых лидеров (Боливия, Аргентина) и составляют около 108 млн т LCE. Однако их изученность в России крайне низкая

нужно запускать уже в ближайшее время, чтобы не проиграть в конкуренции за мировой рынок лития в среднесрочной перспективе. Кроме того, предстоит создать регуляторную базу для добычи и переработки литийсодержащих компонентов. Отдельной задачей является подсчет и постановка запасов лития на государственный баланс с последующей гармонизацией отечественной и международных классификаций. Результатом этой работы станет мировое признание наших запасов гидроминерального литиевого сырья и, как следствие, привлечение внимания зарубежных инвесторов к российской литиевой индустрии. Решение всех этих вопросов, безусловно, потребует совместных усилий ключевых ФОИВ и нефтегазовых компаний, которые в условиях глобальной энергетической трансформации и санкционных ограничений должны быть максимально заинтересованы в обеспечении сырьевого суверенитета и поиске альтернативных источников получения прибыли.

Использованные источники

1. Заруба Е. С., Арифиллин А. М., Зотов Н. Ю. Литий из рассолов: стратегическая опция для российских нефтегазовых компаний в условиях энергоперехода // VYGON Consulting, 2023. – URL: <https://vygon.consulting/products/issue-2069/>
2. Михеева Е. Д., Егоров Я. А. К вопросу о содержаниях лития и попутных компонентов в подземных водах перспективных площадей территории России // Науки о Земле: добыча и переработка, 2022.
3. Минприроды России. Классификация запасов и прогнозных ресурсов теплоэнергетических и промышленных подземных вод. 2011.
4. Руководство по гармонизации стандартов отчетности России и CRIRSCO. 2010.
5. Остроушко Ю. И., Дегтярева Л. В. Гидроминеральное сырьё – неисчерпаемый источник лития. – М.: ЦНИИАТОМИН-ФОРМ, 1999. – 64 с.
6. Вахромеев А. Г. Закономерности формирования и концепция освоения промышленных рассолов (на примере Сибирской платформы): дис. докт. геол.-минер. наук, Москва, 2009. – 380 с.
7. Попов Г. В. Изучение сорбции ионов лития из геотермальных растворов ионообменными смолами // Вестник ТвГУ. Серия «Химия». 2019. № 1(35). С. 199–206.
8. Рябцев А. Д. Патент «Способ получения литиевого концентрата из литиеносных природных рассолов и его переработки в хлорид или карбонат лития».
9. Рамазанов А. Ш., Атаев Д. Р., Каспарова М. А. Получение карбоната лития высокого качества из литийсодержащих природных рассолов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2021. Т. 64. Вып. 4.

ЮАР: проблемы энергетического перехода и энергетической безопасности

South Africa: problems of energy transition and energy security

Алексей МАСТЕПАНОВ

Главный научный сотрудник ИПНГ РАН, д. э. н., профессор РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, академик РАЕН
E-mail: amastepanov@mail.ru

Alexey MASTEPANOV

Chief Researcher of the Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (OGRI RAS), Dr. of economic sci., professor of the National University of Oil and Gas («Gubkin University»), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences
E-mail: amastepanov@mail.ru

Андрей СУМИН

Ведущий научный сотрудник ИПНГ РАН, к. ю. н.
E-mail: andrey-sumin@rambler.ru

Andrey SUMIN

Leading researcher of the Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (OGRI RAS), PhD in law
E-mail: andrey-sumin@rambler.ru

Борис ЧИГАРЕВ

Ведущий инженер по научно-технической информации ИПНГ РАН, к. ф.-м. н.
E-mail: bchigarev@ipng.ru

Boris CHIGAREV

Leading engineer for scientific and technical information at the Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (OGRI RAS), PhD in physics and mathematics
E-mail: bchigarev@ipng.ru

Аннотация. В статье проанализирована энергетическая политика ЮАР в свете обеспечения национальной и региональной энергетической безопасности. Проанализировано южноафриканское законодательство, регулирующее деятельность ТЭК. Дана характеристика энергетическому балансу страны с разбивкой по отраслям ТЭК. Сделан акцент на специфике развития возобновляемой энергетики в стране. Рассмотрена позиция ЮАР по отношению к мировой климатической повестке. Охарактеризован подход властей к энергетическому переходу в национальном масштабе. Показано потенциальное влияние принимаемых в ходе энергетического перехода мер на трансформацию южноафриканской энергетики. Выделена позиция властей относительно роли ископаемых энергоносителей в национальном энергетическом балансе на обозримую перспективу. Дана оценка энергополитическим амбициям ЮАР в регионе к югу от Сахары. Сделан акцент на возможностях для укрепления позиций России в Африке в свете сотрудничества с ЮАР.

Ключевые слова: Африка, Юг Африки, ЮАР, Россия, энергетическая бедность, энергия, энергетический пул, энергетика, возобновляемая энергетика, энергетический переход, энергетические сети, закон, монополия, энергетическая безопасность.

Abstract. The article analyzes the energy policy of South Africa in the light of ensuring national and regional energy security. The South African legislation regulating the activities of the fuel and energy complex is analyzed. The characteristic of the country's energy balance is given, broken down by branches of the fuel and energy complex. The specifics of the development of renewable energy in the country are emphasized. The position of South Africa in relation to the global climate agenda is considered. The approach of the authorities to the energy transition on a national scale is characterized. The potential impact of measures taken during the energy transition on the transformation of South African energy is shown. The position of the authorities on the role of fossil energy carriers in the national energy balance for the foreseeable future is highlighted. The assessment of South Africa's energy and political ambitions in the sub-Saharan region is given. The emphasis is placed on the opportunities for strengthening Russia's position in Africa in the light of cooperation with South Africa.

Keywords: Africa, South African Region, South Africa, Russia, energy poverty, energy, energy pool, energy branch, renewable energy, energy transition, energy networks, law, monopoly, energy security.



ЮАР традиционно выгодно отличается от других стран Африки наличием солидного нормативно-правового массива, регулирующего деятельность ТЭК

Энергетический сектор представляет собой одну из системообразующих отраслей южноафриканской экономики, третьей по величине на африканском континенте после экономики Нигерии и Египта [1, с. 7]. При этом горнодобывающий сектор ЮАР является одним из крупнейших в мире (к примеру, в 2017 г. он давал 8 % национального ВВП). Еще одной характерной особенностью экономики ЮАР является наличие развитой тяжелой промышленности, что подразумевает высокую энергоёмкость (также одну из самых высоких в мире). Так, в 2018 г. на производственный сектор приходилось 51 % от совокупного энергопотребления (из них на химическую и нефтехимическую отрасли 28 %, на производство железа и стали 13 % и на горнодобывающую отрасль 10 %) [1, с. 21]. Соответственно, ЮАР занимает одно из первых мест в мире

по энергозатратности на производство единицы ВВП (в 2019 г. – 8,21 Гигаджоулей на 1000 долл. ВВП по ППС, что в 2,1 раза больше, чем в странах ОЭСР в целом [2]). Правительство страны достаточно давно пыталось заниматься указанной проблематикой. В 2005 г. была принята Национальная стратегия по энергетической эффективности (англ. – National Energy Efficiency Strategy, сокр. – NEES) [3]. Претворению целей программы в жизнь с самого начала препятствовали отсутствие системного подхода и необходимость заниматься более приоритетными задачами, такими, как обеспечение национальной энергетической безопасности с учетом текущих вызовов, важнейшими из которых являются модернизация электроэнергетического сектора и стабилизация электроснабжения в масштабе всей страны.

При этом ни в коем случае нельзя однозначно утверждать, будто проблемы южноафриканского ТЭК проистекают из бессистемности, из отсутствия планирования и четкого видения властями энергетического будущего страны. Напротив, ЮАР традиционно выгодно отличается от других стран Африки наличием солидного нормативно-правового массива, регулирующего деятельность ТЭК и отдельных его отраслей, а также наличием программных документов, принятых на государственном уровне с целью преодоления возникающих в энергетике проблем и создания заделов на будущее. Первым таким системным документом стала изданная в декабре 1998 г. Белая книга по энергетической политике (англ. – White Paper on Energy Policy). Принимая Белую книгу, южноафриканское правительство руководствовалось целью обозначить приоритеты своей политики касательно обеспечения страны энерги-

**Закон о национальной энергетике
собирает образ
раскрывает южноафриканское
восприятие понятия
национальной энергетической
безопасности, которое отличается
поразительной целостностью**



ЛЭП Eskom

Источник: vanderspuyr / depositphotos.com

ей и энергопотребления на предстоящее десятилетие. Документ задумывался как официальный план действий по развитию как национального ТЭК в целом, так и отдельных его отраслей. В качестве целей издания Белой книги были обозначены [4]:

- расширение доступного по цене предложения энергии для населения;
- улучшение управления национальной энергетикой;
- стимулирование экономического развития страны;
- купирование экологических рисков, возникающих из-за функционирования ТЭК;
- укрепление энергетической безопасности посредством диверсификации энергобаланса.

В развитие Белой книги по энергетической политике в последующие годы принимался целый ряд других программных документов – как общего характера, так и профильных.

В ноябре 2003 г. увидела свет еще одна «Белая книга» – Белая книга по возобновляемой энергетике (англ. – White Paper on Renewable Energy). Обнародование данного профильного документа было призвано подчеркнуть намерение правительства стимулировать «развитие, освоение и использование возобновляемых источников энергии в малых и больших масштабах» [5]. Объемный по содержанию документ перечисляет стратегические

цели, которые должны быть достигнуты при освоении имеющихся в стране ВИЭ, описывает правительственное видение роли и места ВИЭ в национальной энергетике, закрепляет принципы осуществления деятельности по развитию возобновляемой энергетики. Кроме того, правительство приняло на себя обязательство регулярно доносить до общественности внутри страны и за рубежом цели принятия указанного документа и способы достижения поставленных в нем целей, а также информировать органы государственного управления об их задачах в этом направлении.

В 2008 г. был принят закон о национальной энергетике (англ. – National Energy Act, действует в редакции 2012 г.). Целями принятия закона являлись [6]:

- обеспечение стабильного, надежного и доступного в ценовом отношении предложения энергии и энергоносителей из разных источников с целью обеспечения благоприятных предпосылок для развития южноафриканского народного хозяйства и преодоления бедности, с учетом экологических требований и необходимости взаимодействия между отраслями национальной экономики;
- необходимость планирования в развитии энергетике, увеличение производства и потребления «зеленой» энергии, создание и поддержание

Головной офис Eskom
Источник: eskom.co.za



**Под влиянием мировых
изменений в ТЭК Правительство
ЮАР разработало в 2010 г.
первый в стране всеобъемлющий
план развития национальной
энергетики – Комплексный
ресурсный план до 2030 г.**

- на должном уровне стратегических запасов энергоносителей, создание, достаточное финансирование и поддержание в рабочем состоянии энергетической инфраструктуры;
- разработка формализованных процедур по сбору и хранению информации и статистики о спросе, предложении и производстве энергии и энергоносителей;
- учреждение особого органа, круг задач которого включал бы разработку мер в области эффективного производства и потребления энергии, а также проведение научных изысканий в сфере энергетике;
- обеспечение надлежащих условий для достижения четырех предыдущих целей.

Анализ перечисленных выше целей дает основания сделать вывод, что закон о национальной энергетике собирательным образом раскрывает южноафриканское восприятие понятия национальной энергетической безопасности, которое само по себе отличается поразительной целостностью.

В отдельную группу стоит выделить документы, формулирующие позицию южноафриканских властей относительно перспектив ядерной энергетики в стране. Хронологически первым таким документом стал принятый в 1999 г. закон об атомной энергии (англ. – Nuclear Energy Act) [7]. Закон явился правовой основой для учреждения ведомства, призванного развивать ядерную энергетику в стране – Национальной энергетической корпорации Южной Африки (англ. – National Energy Corporation of South Africa, сокр. – Necs). Кроме того, указанный нормативно-правовой акт устанавливал сферы взаимо-

Отношение южноафриканских властей к угольной генерации характеризуется в последние годы непостоянством, несмотря на традиционно превалирующую роль угля в национальном энергобалансе

действия между ЮАР и МАГАТЭ, а также регулировал оборот ядерных материалов и необходимого для работы с ними промышленного оборудования. В 1999 г. был принят также закон о Национальном регуляторе атомной энергетики (англ. – National Nuclear Regulator Act) [8]. В 2008 г. был принят ещё один нормативно-правовой акт – закон о Национальном институте утилизации радиоактивных отходов (англ. – National Radioactive Waste Disposal Institute Act) [9]. В октябре того же, 2008 г., был принят уже программный документ по атомной тематике – Основы политики в области ядерной энергии (англ. – Nuclear

АЭС «Коберг», ЮАР



Источник: atomic-energy.ru

Energy Policy). В документе закреплено правительственное видение перспектив развития атомной энергетики в стране: исключительно в мирных целях и с использованием добываемого на национальной территории уранового сырья [10].

До сих пор действует принятый еще в период апартеида (в 1977 г.) закон о нефтепродуктах (англ. – Petroleum Products Act) [11]. Целями принятия данного нормативно-правового акта являлись:

- обеспечение рационального расходования и экономии нефтепродуктов, создание механизма ценообразования на нефтепродукты, сбор и обработка информации об обороте нефтепродуктов на внутреннем рынке, обеспечение надлежащего уровня услуг в сфере оборота нефтепродуктов;
- стимулирование модернизации сектора переработки нефти и производства нефтепродуктов;
- создание национальной системы лицензирования в сферах производства и сбыта ряда нефтепродуктов;
- выработка и нормативное закрепление критериев лицензирования в сферах производства и сбыта ряда нефтепродуктов.



Бывшая электростанция в Йоханнесбурге, ЮАР

Источник: Homocosmos / depositphotos.com

В последние десятилетия энергетический сектор ЮАР претерпевает серьезные изменения – вследствие как тенденций мирового развития, так и внутренних процессов. Под влиянием этих изменений южноафриканское правительство разработало в 2010 г. первый в истории страны всеобъемлющий план развития национальной энергетики – Комплексный ресурсный план (англ. – Integrated Resource Plan, сокр. – IRP), рассчитанный на период до 2030 г.

Комплексный ресурсный план (IRP) фактически пришел на смену упомянутой выше Белой книге по энергетической политике от 1998 г. и был разработан в качестве ориентира, достижение которого должно позволить надежно покрывать потребности страны в электроэнергии. Практическая реализация данного ориентира должна быть обеспечена формированием эффективного энергетического баланса исходя из особенностей национального энергетического сектора и обеспеченности страны энергоносителями [12]. Концепция IRP предполагала его «гибкость», то есть возможность ежегодной корректировки как своевременную реакцию на возникающие вызовы. На практике ежегодные изменения носили скорее косметический характер,

а в 2013 и в 2016 гг. изменения в план не вносились вовсе. Тем не менее, принятие IRP явилось знаковым событием в южноафриканском энергетическом законодательстве, ибо план являлся первым юридически обязывающим документом такого рода для правительства и органов управления всех уровней. В частности, вносимые изменения в сфере развития той или иной подотрасли ТЭК обретали силу правовых норм. Так, в редакции IRP от 2010 г. был зафиксирован приоритет развития угольной и ядерной генерации электроэнергии, что обязывало правительство предпринимать соответствующие шаги в указанных направлениях.

В ЮАР имеется довольно влиятельное «зеленое» лобби, благодаря которому это государство состоит в ряде международных организаций, борющихся с глобальными изменениями климата

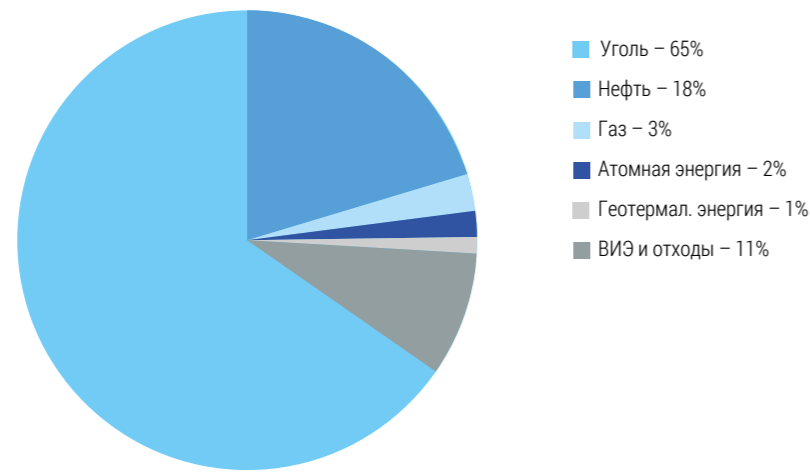


Рис. 1. Структура спроса на первичную энергию в ЮАР в 2018 г.

Источник: [1]

В 2018 г. правительство обнародовало проект новой редакции IRP, в котором была изложена национальная стратегия по развитию производства электроэнергии на период до 2030 г. в соответствии с критерием экономичности (англ. – least-cost). В отличие от редакции 2010 г., в новом проекте отсутствовал приоритет развития угольной генерации, четко не упоминалась и ядерная энергетика. Текст новой редакции IRP содержал лишь обтекаемые формулировки, что ядерная и основанная на новых, экологически щадящих технологиях, угольная генерация вполне могут являться составными частями национального энергетического баланса на период до 2050 г. Будучи вынесенной на публичное обсуждение, новая редакция IRP вызвала неоднозначную реакцию в стране, особенно – в предпринимательском сообществе. В целом проект вызвал позитивный отклик у производственного

сектора, и предсказуемо негативный – у угледобывающей и ядерной отраслей. Противоречивой оказалась и реакция профсоюзов.

В 2019 г. была принята вторая, ныне действующая редакция IRP. Согласно новой редакции, реализация IRP призвана достичь к 2030 г. четырех целей: сделать электроэнергию доступной по цене для всего населения страны, снизить выбросы парниковых газов, сократить потребление пресной воды и диверсифицировать национальный энергетический баланс. Во исполнение перечисленных задач правительство теперь отдает приоритет использованию природного газа в энергетике в качестве «переходного» энергоносителя, что призвано помочь широкому внедрению ВИЭ в производство энергии в национальном масштабе [13].

Продуктовая структура современного спроса на первичную энергию в ЮАР показана на рис. 1.

Отношение южноафриканских властей к угольной генерации характеризуется в последние годы непостоянством, несмотря на традиционно преобладающую роль угля в национальном энергетическом балансе. В 2018 г. правительственные эксперты предлагали вывести к 2030 г. из эксплуатации ряд угольных электростанций совокупной мощностью в 12 ГВт. Компенсировать выпадающие мощности за счет угольных электростанций нового поколения планировалось лишь частично – путем ввода в эксплуатацию строившихся и запланированных к строитель-

В ЮАР традиционно сохраняется большое число сторонников угольной генерации, причем практически по всему политическому спектру. Они с той или иной степенью радикализма выступают против ВИЭ

ству объектов общей мощностью в 7 ГВт. При этом строительство дополнительных угольных электростанций после 2030 г. не предусматривалось вовсе – при условии, что к тому моменту не станут доступны передовые технологии, позволяющие сократить до максимально возможного минимума вредные выбросы в атмосферу. По замыслу авторов указанного плана, в 2030 г. ЮАР должна располагать действующими объектами угольной генерации совокупной мощностью в 34 ГВт (по сравнению с 39 ГВт в 2018 г.). К 2050 г. планировалось оставить в эксплуатации угольные электростанции общей мощностью в 12 ГВт, то есть меньше трети от уровня 2018 г. [3].

Экономика ЮАР занимает далеко не последнее место в мире среди государств, ответственных за крупные объемы выбросов парниковых газов в атмосферу. Согласно статистике, в 1970 г. они составили 250 млн т, а в 2008 г. – уже 490 млн т. Разразившийся в 2008 г. мировой финансовый кризис притормозил экономический рост в ЮАР, что снизило и объемы выбросов углекислоты в атмосферу. Так, в 2015 г. этот показатель составил 460 млн т (14-е место в мире) [3], снизившись к 2019 г. до 433,6 млн т (12-е место) [2]. Неудиви-

ЮАР входит в число крупнейших экспортеров угля, продавая за рубеж около трети от годовой выработки. В 2018 г. на уголь приходилось 12% от общей стоимости южноафриканского экспорта

тельно поэтому, что с некоторых пор правительство страны подвергается давлению со стороны мирового «климатического лобби» в лице правительств ряда западных государств и экологических организаций. Суть этого давления сводится к стандартным в таких случаях требованиям осуществить энергетический переход в экономике, внедряя новые, экологически щадящие технологии и видоизменяя методы ведения народного хозяйства.

Концепция энергетического перехода изначально являлась в Южной Африке предметом ожесточенных дискуссий и имела сильно выраженную полити-

Одной из проблем ЮАР является отсутствия у жителей свободного доступа к воде и энергии

Источник: besphoto / depositphotos.com



ческую окраску. Согласно результатам проведенного в 2015 г. исследования общественного мнения, 45 % опрошенных выразили обеспокоенность климатическими изменениями и их последствиями [14]. В ноябре 2022 г. В. Магуэня, пресс-секретарь Президента ЮАР, объявил, что переход к низкоуглеродной модели хозяйствования является императивом, поскольку бездействие все равно окажет негативный эффект на южноафриканскую экономику. В частности, экспортноориентированные отрасли экономики ЮАР должны иметь возможность сохранять конкурентоспособность на длительную перспективу, ибо рано или поздно им-



Мыс доброй надежды, ЮАР
Источник: zambezi / depositphotos.com

порт товаров из стран с высокими выбросами углекислоты станет облагаться повышенными пошлинами на мировом рынке. Применительно к Южной Африке это означает, что для её экспортных товаров в будущем появятся препятствия именно в странах, являющихся ключевыми торговыми партнерами. Постепенное внедрение мер по энергопереходу должно способствовать более плавной адаптации южноафриканской экономики к неизбежным изменениям на мировых рынках и заодно способствовать созданию новых рабочих мест [15]. В ЮАР имеется довольно влиятельное «климатическое» лобби, благодаря которому это государство состоит в ряде международных организаций, в той

или иной степени ставящих своей целью борьбу с изменениями планетарного климата путем трансформации мирового экономического уклада. В частности, ЮАР является членом BASIC (в составе Китая, Индии, Бразилии и собственно ЮАР), Африканской группы (54 расположенных в Африке государства), «G-77 + Китай» (объединение развивающихся стран, существует с 1964 г.) и «Коалиции стран влажного тропического леса» (англ. сокр. CfrN). Наконец, ЮАР является участницей Парижского соглашения по климату, в рамках которого в сентябре 2015 г. она обязалась предпринять долгосрочные усилия по снижению негативного влияния своей экономики на планетарный климат. Это обязательство было конкретизировано в 2020 г. на основе Южноафриканской долгосрочной стратегии низкоэмиссионного развития и модифицировано по случаю 26-й конференции Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP-26) в Глазго в ноябре 2021 г.

Согласно этой стратегии, ЮАР взяла обязательство («определяемый на национальном уровне вклад» – англ. – «nationally determined contribution», – NDC) снизить к 2030 г. эмиссию парниковых газов до 350–420 млн т CO₂ – экв. [16]. Распоряжением Президента ЮАР в сентябре 2020 г. была учреждена Президентская комиссия по климату, председателем которой является сам президент страны (англ. – Presidential Climate Commission, сокр. – PCC) [17]. По оценке входящей в состав комиссии исполнительного директора Национальной предпринимательской инициативы Джоанн Явич, только для начала энергетического перехода в общенациональных масштабах на период 2023–2027 гг. потребуются финансирование в размере 1,5 трлн рандов. Выступая в декабре 2022 г. на специальном заседании о намерениях на тему «Инвестиционный план справедливого энергетического перехода в Южной Африке» (англ. – South Africa's Just Energy Transition Investment Plan, сокр. – JET-IP), Дж. Явич сделала важную оговорку: практическая реализация указанного инвестиционного плана будет зависеть от характера и объема финансовой поддержки со стороны мирового сообщества, поскольку республика не в состоянии обеспечить необходимое финансирование только за счет внутрен-

них ресурсов. Инвестиционный план JET IP был разработан в соответствии с Южно-Африканским планом национального развития (англ. – South Africa's National Development Plan, сокр. NDP) [18]. Действие официально принятого в феврале 2013 г. плана NDP рассчитано на период до 2030 г. и нацелено на преодоление неравенства, бедности и безработицы в общенациональном масштабе [19]. Основной идеей данного документа является форсированное создание современной

и общему состоянию дел в своей стране на момент принятия NDC, тем самым закрепив за ЮАР юридическую лазейку, которая позволила бы в будущем – при наличии ряда обстоятельств – модифицировать данное обязательство в любом желаемом направлении. В качестве таких обстоятельств были указаны приоритетные направления государственной политики: борьба с бедностью, преодоление всех форм неравенства в обществе, обеспечение широкого доступа к энерго-



Центральный деловой район Йоханнесбурга, ЮАР

Источник: ambeon / depositphotos.com

структуры экономики, причем залогом успешного построения современной экономики прямо названо наличие развитой энергетической инфраструктуры. План NDP предусматривает создание к 2025 г. новых генерирующих мощностей в 10 тыс. МВт в дополнение к имевшимся в базовом 2013 г. 44 тыс. МВт [12, с. 7].

Вместе с тем, принимая на себя обязательство в рамках Парижского соглашения по климату, южноафриканская делегация сделала существенную оговорку. Обозначив обязательство как «соразмерный вклад» (англ. – equitable contribution) в мировые климатические усилия, южноафриканские переговорщики указали на его привязку к объемам выбросов

снабжению с целью ускорения экономического развития [3]. В январе 2022 г. глава Министерства минеральных ресурсов и энергетики (далее – Минэнерго) Гведе Манташе многозначительно заявил, что развивающиеся страны в конечном итоге окажутся не в состоянии выполнить взятые на себя обязательства по снижению выбросов в атмосферу, если развитые страны не предоставят им финансового и технологического содействия при реализации энергетического перехода [20]. Г. Манташе подчеркнул, что при выполнении взятых на себя перед мировым сообществом обязательств по снижению уровня выбросов в атмосферу ЮАР не должна упускать из виду основы национальной

Рост генерирующих мощностей возобновляемой энергетики стал особо заметным в ЮАР с 2013 г., к 2017 г. «зеленая» энергия составила 3,4% от общего объема произведенной электроэнергии страны

безопасности, частью которых является энергетическая безопасность: «Продолжая привлекать инвестиционные средства для постпандемийного восстановления экономики, важно не забывать о рисках, связанных с энергетической бедностью и возникающими из-за климатических изменений реалиями» [21]. По словам министра, «даже если нам придется иметь дело с климатическими изменениями, безопасность поставок энергии должна быть обеспечена в первую очередь. Это даст нам возможность проводить энергетический переход более системно и упорядоченно. Но пока что реальностью наших дней является энергетическая бедность, в результате которой 13 % южноафриканцев по-прежнему не имеют доступа к электроэнергии». Г. Манташе подчеркнул, что местные самоуправления и региональные власти едва ли поддержат меры по энергопереходу, если правительство не сможет обеспечить внутренний рынок стабильными и достаточными поставками всех видов энергии. «Если мы не решим проблему энергетической бедности, а будем заниматься только разработкой планов по борьбе с изменениями климата, – заявил он, – в стране случится восстание. Народ нас просто не услышит. Нашим людям нужна всего лишь энергия – доступная по цене и стабильная. Лишь обеспечив все это, мы можем позволить себе рассуждать, насколько чистая эта энергия» [21]. Во вступительной речи на открытии Африканской нефтяной недели в октябре 2022 г. Г. Манташе – фактически от имени правительства – сделал ещё одну важную оговорку по поводу участия ЮАР в Парижском соглашении по климату. По словам министра, переход к низкоуглеродной энергетике должен основываться на прин-

ципе обеспечения энергетической безопасности и гарантировать соблюдение прав человека, устойчивость человеческого развития, сохранение рабочих мест и развитие национальной экономики в целом. «Переход от производственных процессов с высоким уровнем выброса углекислоты к низкоэмиссионной экономике должен осуществляться в Южной Африке системно и подразумевать использование природного газа, возобновляемых и иных источников энергии, в то же время, снижая традиционную для страны критическую зависимость от использования угля», – заявил министр. По словам Г. Манташе, пропагандируемые в настоящее время на международном уровне борьба с климатическими изменениями и вытекающая из нее необходимость декарбонизации экономики входят в противоречие с жизненно важными приоритетами Африканского континента, к числу которых относятся преодоление энергетической бедности, повышение жизненного уровня населения, индустриализация и технологическое развитие [22]. Характеризуя подход правительства республики к энергопереходу, Г. Манташе подчеркнул, что движение в сторону низкоэмиссионной экономики в стране будет производиться осторожными и выверенными шагами. По его словам, особенности энергоперехода в ЮАР будут определяться «национальной спецификой и практическими возможностями,

Погрузка угля в порту Дурбана, ЮАР
Источник: michaeljung / depositphotos.com



Угольная руда на конвейере для переработки, ЮАР
Источник: SunshineSeeds / depositphotos.com

а также необходимостью поддерживать должный уровень энергетической безопасности, экономического роста и мер по борьбе с бедностью». Не отрицая необходимости стимулирования «зеленой» энергетики, министр уточнил, что правительство страны считает целесообразным развитие всех видов энергетики, в том числе и традиционных, с целью максимальной диверсификации национального энергетического баланса [23].

Отметим также, что в ЮАР традиционно сохраняется большое число сторонников угольной генерации, причем практически по всему политическому спектру. Они с той или иной степенью радикализма выступают против развития «зелёной» энергетики и ратуют за сохранение приоритета угля в национальном энергобалансе. Основных аргументов здесь два: гарантия национальной энергобезопасности (страна по-прежнему располагает солидными запасами угля и инфраструктурой для его добычи и потребления) и социальная политика. В последнем случае приверженцы угля указывают на негативные последствия сокращения его добычи и использования как для всей экономики страны, так и для отдельных её регионов. В частности, если в 1981 г. в угледобыче было занято 135 тыс. работников, то в 2015 г. данный показатель составил лишь 80 тыс. человек. При этом реалистичных альтернатив для высвобо-

ждающихся работников угледобывающей отрасли не предлагается; эксперты лишь предлагают провести оценку социально-экономических последствий уменьшения угля в энергетическом балансе, начиная с 2030 г. [3]. Отдельного упоминания заслуживает и экспортная составляющая южноафриканской угледобычи. ЮАР входит в число крупнейших экспортеров угля, продавая за рубеж около трети от годовой выработки. В 2018 г. на уголь приходилось 12 % от общей стоимости южноафриканского экспорта. Возможное сокращение угледобычи привело бы и к падению экспортной выручки, что правительство страны едва ли может себе позволить. На съезде Южноафриканского молодежного экономического совета, состоявшегося в январе 2022 г., министр Г. Манташе заявил, что страна и впредь станет продолжать курс на сохранение смешанного энергобаланса, невзирая на свои обязательства по снижению выбросов в атмосферу. Намерение руководства страны и далее придерживаться смешанного энергобаланса министр объяснил стратегическими интересами – такими, как обеспечение энергобезопасности и поддержание экономического роста [20].

Редакция IRP от 2010 г. закрепляла существенное внимание правительства к развитию возобновляемой энергетики. В частности, планировалось создать к 2030 г. 17,8 ГВт генерирующих мощностей (исключая гидроэнергетику), из которых на солнечную и ветроэнергетику приходилось бы по 8,4 ГВт. По расчетам авторов первоначальной редакции IRP, к 2030 г. на возобновляемую энергетику должно было бы приходиться 21 % совокупного объема генерирующих мощностей страны. Для стимулирования произво-

Гидроэнергетика рассматривается лишь в качестве вспомогательной отрасли: в силу природно-географических и климатических факторов ЮАР располагает ГЭС совокупной мощностью лишь в 0,7 ГВт



ЛЭП в ЮАР

Источник: lkpro / depositphotos.com

дителей «зеленой» электроэнергии были введены (по примеру ряда зарубежных государств) льготные тарифы за вырабатываемое и запитываемое ими в энергосети электричество, и сбыт всего объема производимой ими электроэнергии. В 2012 г. эта схема была пересмотрена на основе рыночного критерия: теперь доступ в публичные передающие сети гарантировался только победителям тендеров, способным предлагать «зеленую» электроэнергию по наиболее низким ценам.

В соответствии с IRP Правительство ЮАР разработало амбициозную программу приобретения возобновляемой энергии у независимых производителей

В ЮАР нет месторождений нефти. Импорт обеспечивает свыше 90% потребности ЮАР в жидком топливе. Основным поставщиком сырой нефти в страну традиционно является Саудовская Аравия (43%)

(англ. – Renewable Energy Independent Power Producer Procurement Programme, сокр. – REIPPPP). Программа призвана разнообразить национальный энергобаланс и стимулировать генерацию солнечной, ветро- и гидроэнергетики, а также производство биогаза небольшими генерирующими компаниями. В 2018 г. в рамках REIPPPP было произведено почти 11 ГВт электроэнергии [1, с. 19–20].

Рост генерирующих мощностей возобновляемой энергетики стал особо заметным с 2013 г., и к 2017 г. «зеленая» энергия составила 3,4 % совокупного объема произведенной электроэнергии. Одновременно в этот четырехлетний период отмечалось резкое падение себестоимости генерации в возобновляемой энергетике, особенно в солнечной (на 80 %) и ветроэнергетике (на 60 %). На тот момент себестоимость производства «зеленой» электроэнергии оказалась даже ниже расчетной себестоимости генерации на находившихся в процессе проектирования и строительства угольных электростанций. Данный факт привлек внимание инвесторов, в результате возобновляемая энергетика стала объектом притяжения для крупных по местным меркам капиталовложений. В частности, по состоянию на третий квартал 2018 г.

объем накопленных инвестиций в секторе составил 2,6 млрд долл. США, что в 90 раз превысило уровень аналогичного периода 2017 г. [3].

При разработке проекта нового IRP в 2018 г. было решено ускорить темпы создания «зеленых» генерирующих мощностей. Согласно проекту, к 2030 г. в стране должно было бы функционировать 8 ГВт в солнечной и 11,4 ГВт в ветроэнергетике, причем совокупный объем возобновляемой энергетики должен был составить уже 20 ГВт (не включая сюда гидроэнергетику). Таким образом, на «зеленую» энергетику должно было приходиться уже 27 % общенационального объема электрогенерации. В том же 2018 г. энергетический монополист Eskom завершил процесс согласования 27 проектов возобновляемой энергетики совокупной мощностью в 2,3 ГВт на сумму в 4,7 млрд долл. США. Завершению согласования предшествовали многочисленные административные проволочки на протяжении двух лет. Даже момент подписания окончательной редакции проектов затормозился на месяц вследствие судебных исков со стороны профсоюзов угольной энергетики, пытавшихся торпедировать проекты. Более того, уже и после завершения всех согласительных процедур практическая реализация многих проектов застопорилась. Основными причинами стали опять-таки административная волокита, несогласованность властей разного уровня и упомянутая хроническая недостаточность финансовых ресурсов у Eskom.

Характерно, что в развитии «зеленой» энергетики приоритет в настоящий момент отдается солнечной и ветроэнергетике. По данным Минэнерго ЮАР, введенные в эксплуатацию в соответствии с упомянутой выше программой REIPPPP 32 объекта ветроэнергетики в настоящее время вырабатывают совокупно 3063 МВт электроэнергии, что укрепляет энергобезопасность страны и оказывает позитивный эффект на социальную сферу. Так, при реализации указанных 32 проектов было создано 23 тыс. рабочих мест, а общий экономический эффект от функционирования проектов уже составил 18,9 млрд рандов. Благоприятное влияние ветроэнергетики проявляется, в том числе, в ее способности запитывать в сети электроэнергию, вырабатываемую в утренние и вечерние часы, характеризующиеся пи-

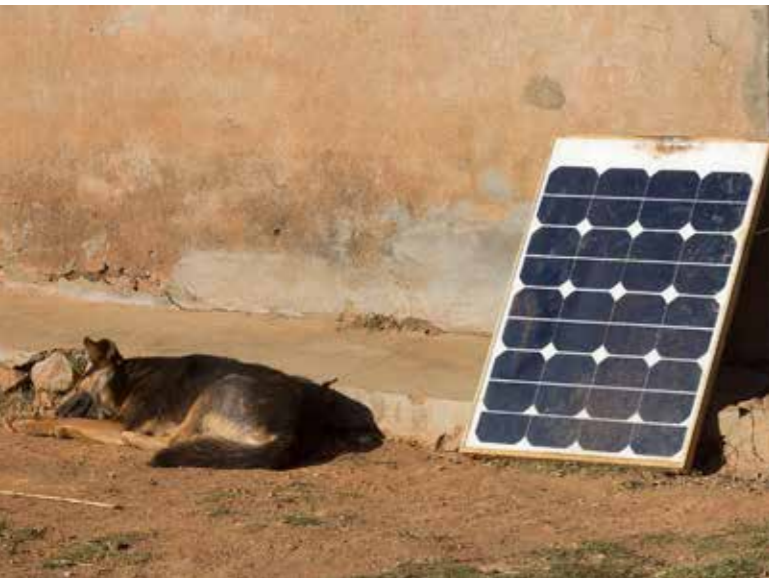
ковым спросом со стороны потребителей. Учитывая данный положительный опыт, Минэнерго страны планирует реализацию дальнейших проектов ВИЭ совокупной производительностью в 14 981 МВт [23]. Гидроэнергетика рассматривается лишь в качестве дополнительной, вспомогательной отрасли: в силу природно-географических и климатических факторов ЮАР располагает гидрогенерирующими электростанциями совокупной мощностью лишь в 0,7 ГВт. Кроме того, ежегодно импортируется электроэнергия с ГЭС Cahora Bassa Мозамбика. Также планируется ежегодно импортировать электроэнергию с гидроэлектростанций

Ветряная турбина в Западном Кейпе, ЮАР
Источник: daniel / depositphotos.com

Демократической Республики Конго. Согласно IRP в редакции 2019 г., к 2030 г. вырабатываемая на объектах гидрогенерации электроэнергия должна составить 6 % национального энергобаланса [3].

Продолжать системное развитие «зеленой» энергетики власти намерены, в том числе, посредством специально учрежденного в 2010 г. для поддержки независимых производителей электроэнергии Управления по делам независимых производителей энергии (англ. – Independent Power Producer Office, сокр. – IPPPO) [24]. По мнению Минэнерго страны, внедряемая данным ведомством программа действий позитивно зарекомендовала себя на практике.

Развитие «зеленой» энергетики видится в настоящее время властям ЮАР в виде двух связанных друг с другом направлений: дальнейшее увеличение генерирующих мощностей на ВИЭ и расширение инфраструктуры для бесперебойной подачи «чистой» электроэнергии потребителям. По состоянию на июнь 2021 г. в рамках указанной программы по итогам четырех успешно проведенных тендеров было введено в эксплуатацию генерирующих мощностей на ВИЭ совокупной мощностью 5422 МВт, а к началу 2022 г. этот показатель возрос до 6422 МВт [25]. В ближайшем будущем IPPO планирует довести общий объем создаваемых под



Солнечные панели в ЮАР

Источник: michaklootwijk / mdepositphotos.com

его эгидой генерирующих мощностей на ВИЭ до 6800 МВт. Ведомство работает над разработкой дополнительной программы «снижения рисков», которая предполагает создание еще 2000 МВт генерирующих мощностей [20].

Говоря о развитии возобновляемой энергетики в ЮАР, необходимо иметь в виду еще один, присущий именно этой стране аргумент в пользу встраивания в климатическую повестку. Выступая на Горнодобывающей инвестиционной конференции в Северо-Западной провинции в январе 2022 г., министр минеральных ресурсов и энергетики ЮАР Г. Манташе отметил высокую обеспеченность страны месторождениями полезных ископаемых, необходимых для производства работающего на ВИЭ оборудования. По данным этого министерства, на одну лишь Северо-Западную провинцию страны приходится как минимум половина мировых запасов металлов платиновой группы и редкоземельных металлов, без которых не обойтись в производстве ветротурбин, аккумуляторов, магнитов и солнечных панелей. Существенные запасы этих стратегически важных полезных ископаемых предполагаются также в Северо-Капской провинции и в провинции Лимпопо. По мнению министра, данный факт дает стране важное конкурентное преимущество в реализации энергетического перехода. Спрос на добываемые в ЮАР полезные ископаемые будет только возрастать, и доступ к ним способен гарантировать успех энергетического перехода во многих государствах мира [21] и, разумеется, обеспечить солидный приток экспортной выручки на длительную перспективу.

Объем эмиссии парниковых газов непрерывно растет и в результате роста количества транспортных средств в стране. Если в 2005 г. на транспортный сектор приходилось 9 % общенационального объема выбросов углекислоты в атмосферу, то в 2015 г. – уже 11 %, а к 2050 г. данный показатель может и вовсе утроиться [3]. Власти страны неоднократно пытались если не повернуть вспять, то хотя бы притормозить эту тенденцию. В 2017 г. была даже разработана рассчитанная на период до 2050 г. Стратегия «зеленого» транспорта (англ. – Green Transport Strategy) [26]. Впрочем, данный документ носит декларативный характер, ибо не содержит конкретных целевых обязательств по снижению уровня выбросов. Еще в 2007 г. правительство с помпой анонсировало Стратегию промышленного производства биотоплива (англ. – Biofuels Industrial Strategy) [27]. Практическая реализация стратегии была намечена на 2015 г., но – ожидаемо – не состоялась. Причиной, по которой документ фактически положили под сукно, стали многочисленные опасения по поводу возможного негативного влияния внедрения биотоплива на продовольственную безопасность. Вероятно, данные опасения были небеспочвенны: под выращивание технических культур, пригодных для переработки в биодизель, планировалось выделить обширные зе-

мельные угодья, которые тем самым оказались бы выведены из традиционного сельскохозяйственного оборота. В 2019 г. власти предприняли попытку вдохнуть новую жизнь в концепцию производства биодизеля [28], но ее реализации помешали опять же противодействие поборников продовольственной безопасности и начавшаяся год спустя пандемия. В 2013 г. правительство вознамерилось было развивать в стране электромобильность; было объявлено о запуске дорожной карты по созданию производства электромобилей (англ. – Electric Vehicle Industry Road Map) [29]. Инициатива с самого начала являлась мертворожденной, ибо ЮАР не располагала необходимыми финансовыми средствами для создания с нуля производства электромобилей и инфраструктуры для их обслуживания и эксплуатации. Кроме того, в стране отсутствовал платежеспособный спрос на большое количество электромобилей. В целом неудачными оказались и предпринятые в 2014 г. усилия по созданию маршрутной сети электробусов в крупных городах страны [30]. Ничем закончились также прочие хаотичные попытки властей сократить объемы вредных выбросов в атмосферу на транспорте.

ЮАР не располагает собственными нефтяными месторождениями, и импортная нефть обеспечивает свыше 90 % потребности страны в жидком топливе. Основным поставщиком сырой нефти в страну традиционно является Саудовская Аравия (43 % по состоянию на 2018–21 гг.). Структура импорта страной нефти и нефтепродуктов в 2018 г. показана на рис. 2.

Внутреннее производство обеспечивает порядка 10 % потребности страны

ЮАР сумела разработать собственные технологии переработки угля в синтетическое горючее для транспорта. На протяжении десятилетий страна была мировым лидером по производству такого топлива

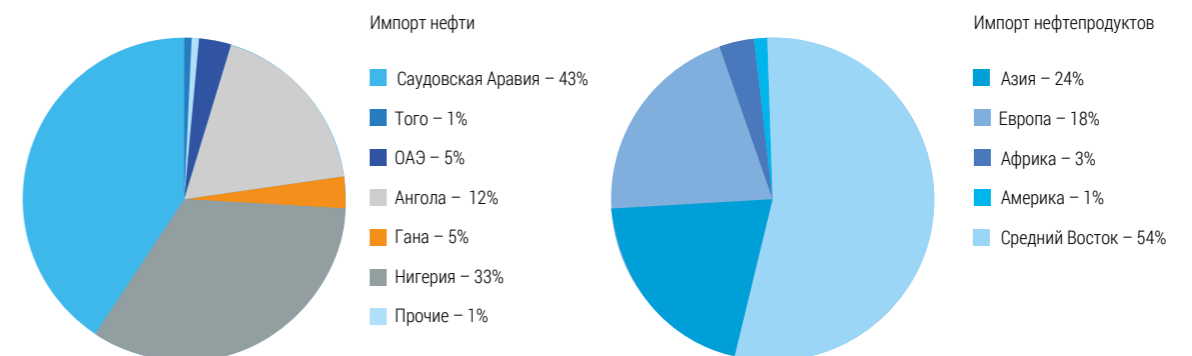
в жидком топливе. Еще в период апартеида из-за наложенного международным сообществом нефтяного эмбарго страна сумела разработать собственные технологии переработки угля в синтетическое горючее для транспортного сектора. На протяжении десятилетий ЮАР оставалась мировым лидером в выработке моторного топлива из каменного угля. Лишь в 2017 г. расположенная в Йоханнесбурге компания Sasol заявила о намерении отказаться от производства синтетического горючего из-за экономической нецелесообразности, высокой энергоемкости процесса и повышенного количества парниковых газов, образующихся при использовании данной технологии.

За счет собственной нефтепереработки ЮАР покрывает 66 % предложения нефтепродуктов на внутреннем рынке, еще 23 % импортируется (рис. 2).

В последнее время южноафриканские власти, явно претендующие на лидерство в Африке южнее Сахары, пытаются выступать от имени региона и в вопросах обеспечения энергетической безопасности,

Рис. 2. Структура импорта ЮАР нефти и нефтепродуктов в 2018 г.

Источник: [1]



в том числе по поводу нефти. Так, во вступительной речи, приуроченной к открытию Африканской нефтяной недели, состоявшейся в Кейптауне в октябре 2022 г., глава Минэнерго ЮАР Г. Манташе заявил, что африканские страны не могут позволить себе и далее импортировать извне готовые нефтепродукты, в то время как уже собственных разведанных месторождений нефти вполне хватит для удовлетворения потребностей континента. Продолжая импортировать готовые нефтепродукты из-за пределов континента, африканские страны способствуют сохранению архаичных и высокорисковых цепочек поставок и тем самым подрывают собственную энергетическую безопасность. Министр обратил внимание на имеющее в настоящее время место парадоксальное явление: в то время как на всём африканском континенте, включая ЮАР, открываются всё новые нефтяные месторождения, ведущие мировые нефтяные компании предпочитают сворачивать своё присутствие в Африке. По словам министра, развитие собственной нефтегазовой отрасли способно не только укрепить энергетическую безопасность Африки, но и стимулировать развитие иных важных отраслей экономики – таких, как химическая промышленность (производство удобрений) и сельское хозяйство. Отдельно южноафриканский министр упомянул перспективы развития нефтяного экспорта. В настоящий момент две трети добываемой в Африке нефти-сырца потребляется внутри континента, а ещё треть – отправляется на экспорт. В контексте намерений Евросоюза отказаться от импорта углеводородов из России Африка могла бы предложить европейским странам больше своих нефти и газа, направив дополнительные

Газ не играет заметной роли в энергобалансе ЮАР (3%). Небольшие объемы газа добываются на шельфе страны, а основная часть импортируется из Мозамбика по газопроводу «Мапуту – Гаутенг»



Трущобы Йоханнесбурга, ЮАР
Источник: *blogs.oregonstate.edu*

доходы от экспорта на стимулирование экономического развития. Вместе с тем Г. Манташе указал на продолжающиеся настойчивые попытки зарубежных стран понудить Африку и дальше импортировать нефтепродукты в ущерб развитию местного их производства. ЮАР разработала целую национальную программу привлечения внутреннего и внешнего финансирования с целью стимулировать поиск и геологоразведку месторождений углеводородов и их последующую переработку внутри страны [22].

Характерно, что в своем обращении южноафриканский министр указал на общеафриканский характер энергетической безопасности, призвав страны континента говорить «одним голосом» на данную тему. Еще одной характерной деталью, озвученной министром, стало сформулированное им толкование энергетической безопасности Африки как комплексного понятия, как залога благосостояния «народа Африки», экономического процветания, благоприятной природной среды и продовольственной безопасности континента [22].

Природный газ не играет заметной роли в энергобалансе ЮАР (3 % в 2018 г.) [1]. Незначительное количество природного газа добывается на шельфе страны, а основная часть потребляемого газа импортируется из Мозамбика по газопроводу «Мапуту – Гаутенг». Газораспре-

делительная система охватывает в настоящее время четыре из девяти провинций страны [31]. Несмотря на невысокую степень использования природного газа, в ЮАР наработана солидная нормативно-правовая база на этот счет. В 2001 г. по инициативе Минэнерго страны был разработан закон о газе (англ. – Gas Act, действует в редакции 2005 г.) [32]. Согласно преамбуле, закон о газе был принят с целью развития газопроводной инфраструктуры, для создания правовой основы использования природного газа в стране и функционирования Национального газового регулятора (англ. – National Gas Regulator). В 2007 г. в развитие закона о газе была издана директива о трубопроводном газе (англ. – Piped Gas Regulations). В 2017 г. южноафриканское правительство под предлогом стремления снизить объем вредных выбросов в атмосферу из-за сжигания угля одобрило план разведки и добычи сланцевого газа в полупустынном регионе Кару (англ. – Karoo) [33]. В сентябре 2018 г. тогдашний министр энергетики страны Джефф Радебе призвал к скорейшему устранению административных барьеров, препятствующих разведке и добыче сланцевого газа в стране [34]. Призыв министра стал реакцией на галопирующие цены на все виды топлива, обуздать которые правительство оказалось не в состоянии. В настоящее время планы по разработке сланцевого газа по-прежнему остаются лишь на бумаге. Причин тому несколько. Во-первых, у правительственных экспертов до сих пор нет единого мнения по поводу размера запасов месторождений сланцевого газа. В 2018 г. совокупные запасы оценивались в 13 трлн куб. футов; этого объема при сохранении текущего уровня потребления хватило бы на 80 лет. Между тем лишь тремя годами ранее, в 2015 г., Минэнерго США оценивало южноафриканские запасы сланцевого газа в 389,7 трлн куб. футов, т. е. почти в 30 раз больше [35]. Кроме сохраняющейся неясности с объемом запасов, имеются сомнения в экономической и экологической целесообразности их разработки. Регион не относится к числу богатых водными ресурсами, в то время как для разработки сланцевых углеводородов требуются существенные объемы воды [36]. Между тем план IRP в редак-

ции 2019 г. предусматривает увеличение доли газовой генерации электроэнергии – главным образом как дополнение и возможная альтернатива возобновляемой энергетике.

Выступая в Кейптауне в сентябре 2022 г. на Южноафриканской нефтегазовой конференции, заместитель министра минеральных ресурсов и энергетики Нобухле Нкабане заявила, что ископаемые углеводороды, в особенности нефть и природный газ, в обозримом будущем останутся неотъемлемой частью мирового энергетического баланса, и ЮАР намерена проводить свою энергетическую политику, исходя из данной предпосыл-



Кейптаун, ЮАР
Источник: *michaeljung / depositphotos.com*

ки. Поэтому власти страны намерены стимулировать разведку и разработку нефтегазовых месторождений на своей территории и снижать зависимость от импорта нефтепродуктов, который стабильно ухудшает платежный баланс страны. Что касается природного газа, то его использование в качестве топлива приводит к выбросу в атмосферу относительно меньших объемов углекислоты, нежели в случае с другими видами ископаемых энергоносителей. Тем самым в мире уверенно складывается консенсус относительно позитивной роли газа в обеспечении энергетического перехода. Основываясь на заключениях южноафриканских технических экспертов, Н. Нкаба-

не сделала вывод: экономика ЮАР сможет достичь поставленных политическим руководством целей по снижению выбросов в атмосферу, при этом не подрывая собственную энергетическую безопасность, лишь при сочетании двух предпосылок – строительстве генерирующих мощностей на ВИЭ и широком использовании природного газа в энергетике [37].

За последнее время в ЮАР уже было открыто несколько газовых месторождений, в том числе шельфовых [37]. Учитывая данную ситуацию, Правительство ЮАР развивает энергетическое сотрудничество и с соседними государствами. Созданы двухсторонние газовые комиссии с Нами-



АЭС «Коберг», ЮАР
Источник: *atomic-energy.ru*

бийей и Мозамбиком, планируется учредить такие же комиссии с Анголой и Танзанией. Сферой деятельности газовых комиссий являются кооперация и координация в поиске и разведке месторождений природного газа, во внедрении новых, экологически щадящих технологий, в добыче и торговле природным газом, а также в социально-экономической сфере.

Несмотря на тот факт, что добыча урановой руды играет заметную роль в южноафриканском горнодобывающем секторе, атомная энергетика составляет лишь малую часть энергобаланса страны. Единственная в стране АЭС «Куберг» (мощностью 1,9 ГВт), введенная в эксплуатацию в 1984 г., находится в собствен-

ности и управлении всё той же монополии Eskom. Эта АЭС должна выработать свой эксплуатационный ресурс в середине 2040-х гг., но в январе 2022 г. глава Минэнерго ЮАР объявил о намерении продлить его ещё на 20 лет [20].

В настоящий момент власти ЮАР занимают невнятную позицию в отношении перспектив ядерной энергетики в стране. В частности, IRP в редакции 2019 г. не содержит планов строить новые АЭС на период до 2030 г., но в то же время не исключает такой возможности в будущем. Вполне вероятно, что перспективы у атомной энергетики в ЮАР все-таки имеются: в январе 2022 г. Минэнерго страны классифицировал ядерную энергетику как «чистую» [20].

Выводы

Проведенный анализ текущего состояния энергетики ЮАР позволяет сделать следующие выводы.

Энергетическая безопасность имеет первостепенную важность не только для поддержания работоспособности национальной энергетики, но является также гарантией бесперебойного функционирования народного хозяйства любого государства в целом. От степени обеспечения энергетической безопасности зависят потенциал любой страны к устойчивому развитию, а также способность выйти на возобновление экономического роста в кризисные периоды. Особую актуальность данный вывод имеет в отношении развивающихся государств, на что прямо указывают и южноафриканские власти [37]. В свою очередь, гарантией обеспечения энергетической безопасности является бесперебойное предложение всех видов энергии на национальном рынке [23].

Одной из основных проблемой всего Африканского континента является на сегодняшний день энергетическая бедность, преодолеть которую возможно, лишь наладив стабильные поставки энергоносителей. В то время как большинство расположенных на других континентах государств работают над совершенствованием своих систем энергоснабжения, делая упор на расширение производства «чистой» энергии, страны южнее Сахары по-прежнему пытаются обеспечить для своего населения всеобщий и стабильный доступ к энергоснабжению. Напомним,

что в настоящий момент около 600 млн (43 %) жителей Африки не имеют доступа к электроэнергии [38].

Логика текущего момента диктует потребность в большей опоре на внутренние возможности. Африка располагает крупными запасами ископаемых энергоносителей – как разведанных, так и предполагаемых. Разработка собственных нефтегазовых, угольных и урановых месторождений позволит государствам Африки использовать добываемые энергоносители для развития своих экономик и социальной сферы, пополнит бюджеты дополнительными доходами за счет их экспорта и, как следствие, даст возможность осуществлять более независимую политику. Неслучайно глава Минэнерго ЮАР Г. Манташе призвал в 2022 г. не умалять значение ископаемых углеводородов для экономического развития Африки [38].

ЮАР придает особое значение расширению использования природного газа для укрепления национальной энергетической безопасности. По мнению южноафриканских экспертов, в период 2023–2030 гг. две трети добываемых в Африке нефти и природного газа будут потребляться самими африканскими странами, что ставит также вопрос о развитии инфраструктуры по торговле углеводородами внутри континента [38].

Наряду с существенными запасами ископаемых углеводородов Африка рас-

Перебои с электричеством в ЮАР
Источник: *wsj.com*



Власти ЮАР занимают невнятную позицию в отношении перспектив ядерной энергетики. Единственная в стране АЭС «Куберг», запущенная в 1984 г., должна выработать свой ресурс в 2040-х гг.

полагает и богатыми возобновляемыми энергетическими ресурсами, которые возможно широко использовать для развития «зеленой» энергетики. Как отметил министр минеральных ресурсов и энергетики ЮАР Г. Манташе, выступая 18 октября 2022 г. на конференции «Африканская энергетическая неделя», «Наш континент, Африка, обладает потенциалом для получения 11 тераватт солнечной энергии, 350 гигаватт гидроэнергии, 110 гигаватт энергии ветра и еще 15 гигаватт геотермального потенциала. Тем не менее, континент производит гораздо меньше электроэнергии для своего народа, который по-прежнему находится в ловушке энергетической бедности. Это неоправданно и больше не может продолжаться». И добавил: «Мы не можем позволить себе сидеть сложа руки и позволить, чтобы эти проекты полностью принадлежали иностранным гражданам». Обращаясь к участникам конференции, министр призвал лидеров африканских стран обеспечить доступ широких слоев населения к электроэнергии. Доступность электроэнергии, по мнению министра, является основной предпосылкой для инклюзивного и устойчивого экономического роста на континенте [38]. Данное и другие подобные программные заявления южноафриканских политиков на мероприятиях с энергетической повесткой дня дают основания полагать, что ЮАР претендует на роль лидера региона к югу от Сахары в том, что касается энергетических вопросов.

Изложенные выводы позволяют заключить, что России есть, что предложить странам к югу от Сахары, в том числе и ЮАР. Речь идет о компетенциях в области геологоразведки и освоении месторождений

энергоносителей, технологиях производства энергетического оборудования и строительства АЭС и развития энергетической инфраструктуры. Кроме того, членство ЮАР в объединении BRICS целесообразно использовать для укрепления позиций этой международной организации в деле снижения зависимости других африканских стран от коллективного Запада в обеспечении их энергетической безопасности.

В то же время сотрудничество России с ЮАР в энергетической сфере пока не получило должного развития, хотя ещё в марте 2013 г. было подписано межправительственное Соглашение о сотрудничестве в области энергетики. К наиболее перспективным направлениям такого сотрудничества можно отнести геологоразведку, добычу и переработку полезных ископаемых, строительство энергетических объектов, включая ГЭС, сооружение нефте- и газопроводов. Большой потенциал имеет и сотрудничество в области повышения энергоэффективности и разработки энергоэффективных технологий.

Эту проблему власти ЮАР понимают, и готовы решать. Хорошие перспективы сотрудничества имеются и в области разработки новых технологий и материалов для возобновляемой энергетики, технологий аккумулирования энергии.

Статья подготовлена по результатам работ, выполненных в рамках госзадания ИПНГ РАН (тема № FMME-2022-0004 – «Фундаментальный базис энергоэффективных, ресурсосберегающих и экологически безопасных, инновационных и цифровых технологий поиска, разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений, исследование, добыча и освоение традиционных и нетрадиционных запасов и ресурсов нефти и газа; разработка рекомендаций по реализации продукции нефтегазового комплекса в условиях энергоперехода и политики ЕС по декарбонизации энергетики (фундаментальные, поисковые, прикладные, экономические и междисциплинарные исследования)». Рег. номер учёта в РОСРИД: 122022800270-0.



Солнечные панели в ЮАР

Источник: photosky / depositphotos.com

Использованные источники

1. *The South African Energy Sector Report 2021 // Department of Mineral Resources and Energy, Republic of South Africa* – URL: <https://www.energy.gov.za/files/media/explained/2021-South-African-Energy-Sector-Report.pdf>
2. *Key World Energy Statistics 2021. IEA. September 2021.* – URL: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>
3. *The Carbon Brief Profile: South Africa.* – URL: <https://www.carbonbrief.org/the-carbon-brief-profile-south-africa/>
4. *White Paper on the Energy Policy of the Republic of South Africa* – URL: https://www.energy.gov.za/files/policies/whitepaper_energypolicy_1998.pdf
5. *White Paper on renewable energy. November 2003.* – URL: https://unfccc.int/files/meetings/seminar/application/pdf/sem_sup1_south_africa.pdf
6. *National energy Act 34 of 2008.* – URL: <https://www.gov.za/documents/national-energy-act#:~:text=to%20provide%20measures%20for%20the,for%20all%20matters%20connected%20therewith>
7. *Nuclear Energy Act 46 of 1999.* – URL: <https://www.gov.za/documents/nuclear-energy-act>
8. *National Nuclear Regulator Act 47 of 1999:* – URL: <https://www.gov.za/documents/national-nuclear-regulator-act>
9. *National Radioactive Waste Disposal Institute Act 53 of 2008.* – URL: https://www.energy.gov.za/files/policies/act_nuclear_53_2008_NatRadioActWaste.pdf
10. *Nuclear Energy Policy for the Republic of South Africa.* – URL: <https://www.gov.za/documents/nuclear-energy-policy-republic-south-africa>
11. *Petroleum Products Act 120, 1977.* – URL: https://www.gov.za/sites/default/files/gcis_document/201504/act-120-1977.pdf
12. *Perspectives on the Renewable Energy Independent Power Producer Procurement Programme (REIPPPP) and the investment and business opportunities it offers.* – URL: <https://www.energy.gov.za/files/WOESA/2015/northwest/Perspectives-on-the-REIPPPP-and-the-investment-and-business-opportunities-it-offers.pdf>
13. *Integrated Resource Plan (IRP 2019), October 2019.* – URL: <https://www.energy.gov.za/irp/2019/IRP-2019.pdf>
14. *Concern about Climate Change and Its Consequences.* Pew Research Center, November 5, 2015. – URL: <https://www.pewresearch.org/global/2015/11/05/1-concern-about-climate-change-and-its-consequences/>
15. *Grant funding also needed for energy transition.* SA News, November 14, 2022. – URL: <https://www.sanews.gov.za/south-africa/grant-funding-also-needed-energy-transition>
16. *South Africa. First Nationally Determined Contribution under the Paris Agreement. Updated September 2021.* – URL: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/South%20Africa%20updated%20first%20NDC%20September%202021.pdf>
17. *Presidential Climate Commission. Towards a Just Transition.* – URL: <https://www.climatecommission.org.za>
18. *South Africa's Just Energy Transition Investment Plan (JET IP) 2023-2027.* – URL: <https://www.thepresidency.gov.za/content/south-africa%27s-just-energy-transition-investment-plan-jet-ip-2023-2027>
19. *National Development Plan 2030.* – URL: <https://www.gov.za/issues/national-development-plan-2030>
20. *SA will continue with energy mix plans.* SA News, January 14, 2022. – URL: <https://www.sanews.gov.za/south-africa/sa-will-continue-energy-mix-plans>
21. *Mining industry can contribute to just energy transition: Mantashe.* – URL: <https://www.sanews.gov.za/south-africa/mining-industry-can-contribute-just-energy-transition-mantashe>
22. *Africa's oil and gas resources can help accelerate energy security.* SA News, October 4, 2022. – URL: <https://www.sanews.gov.za/south-africa/africas-oil-and-gas-resources-can-help-accelerate-energy-security>
23. *Renewable energies «crucial» for energy security, economic growth.* SA News, October 12, 2022. – URL: <https://www.sanews.gov.za/south-africa/renewable-energies-crucial-energy-security-economic-growth-mantashe>
24. *Independent Power Producer Procurement Programme.* – URL: <https://www.ipp-projects.co.za/Home/About>
25. *Renewable Independent Power Producer Programme.* – URL: <https://www.gov.za/about-government/government-programmes/renewable-independent-power-producer-programme>
26. *Draft Green Transport Strategy: (2017-2050).* – URL: <https://lib.uct.ac.za/government-publications/articles/2017-09-18-draft-green-transport-strategy-2017-2050>
27. *Biofuels Industrial Strategy of the Republic of South Africa.* Department of Minerals and Energy, December 2007. – URL: [https://www.energy.gov.za/files/esources/renewables/biofuels_indus_strat.pdf\(2\).pdf](https://www.energy.gov.za/files/esources/renewables/biofuels_indus_strat.pdf(2).pdf)
28. *SA looks to kickstart its biofuels industry,* in: Moneyweb.co.za, 1 October 2018. – URL: <https://www.moneyweb.co.za/news-fast-news/south-africa-looks-to-kickstart-its-biofuels-industry/>
29. *The dti to launch the electric vehicle industry road map.* – URL: <https://www.gov.za/dti-launch-electric-vehicle-industry-road-map>
30. *Bus Rapid Transit System (BRT).* – URL: <https://www.gov.za/about-government/bus-rapid-transit-system-brt>
31. *Oil and Gas Laws and Regulations South Africa 2023.* – URL: <https://iclg.com/practice-areas/oil-and-gas-laws-and-regulations/south-africa>
32. *Gas Act 48 of 2001.* – URL: <https://www.wylie.co.za/wp-content/uploads/GAS-ACT-NO.-48-OF-2001.pdf>
33. *Shale gas in South Africa: game changer or damp squib,* in: *The Conversation*, October 4, 2017. – URL: <https://theconversation.com/shale-gas-in-south-africa-game-changer-or-damp-squib-83459>
34. *Radebe moots shale gas exploration as answer to high fuel price,* in: *Engineering News*, 13th September 2018. – URL: <https://www.engineeringnews.co.za/article/radebe-moots-shale-gas-exploration-as-answer-to-high-fuel-price-2018-09-13>
35. *World Shale Resource Assessments.* – URL: <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>
36. *Explainer: unpacking the issues around fracking in South Africa,* in: *The Conversation*, July 13, 2017. – URL: <https://theconversation.com/explainer-unpacking-the-issues-around-fracking-in-south-africa-80513>
37. *Energy security critical for economic recovery.* SA News, September 15, 2022. – URL: <https://www.sanews.gov.za/south-africa/energy-security-critical-economic-recovery>
38. *Africans should own Independent Power Projects: Mantashe.* SA News, October 18, 2022. – URL: <https://www.sanews.gov.za/south-africa/africans-should-own-independent-power-projects-mantashe>
39. *National Energy Crisis Committee of Ministers briefs media on National Energy Crisis.* – URL: <https://www.gov.za/speeches/media-briefing-national-energy-crisis-committee-ministers-1-aug-2022-0000>

Управление старением бетонных конструкций АЭС

Control of aging of concrete structures of nuclear power plants

Андрей ПУСТОВГАР

Научный руководитель НИИ строительных материалов и технологий, НИУ МГСУ; с. н. с. ИМАШ РАН, к. т. н.

E-mail: PustovgarAP@mgsu.ru

Andrey PUSTOVGAR

Ph.D., Scientific Supervisor of the Research Institute of Building Materials and Technologies, NRU MGSU; IMASH RAN

E-mail: PustovgarAP@mgsu.ru

Владимир ПОТАПОВ

Заместитель директора ВНИИАЭС-НТП, директор отделения управления ресурсом АЭС, АО «ВНИИАЭС»

E-mail: vvpotapov@vniiaes.ru

Vladimir POTAPOV

Deputy Director of VNIIAES-NTP, Director of the NPP Resource Management Department, JSC «VNIIAES»

E-mail: vvpotapov@vniiaes.ru

Алексей АДАМЦЕВИЧ

Старший научный сотрудник НИИ строительных материалов и технологий, НИУ МГСУ, к. т. н.

E-mail: AdamtsevichAO@mgsu.ru

Aleksey ADAMTSEVICH

Ph.D., Senior Researcher, Research Institute of Building Materials and Technologies, NRU MGSU

E-mail: AdamtsevichAO@mgsu.ru

Владимир ИЛЬИН

Заместитель руководителя департамента – начальник отдела, АО «ВНИИАЭС»

E-mail: vailin@vniiaes.ru

Vladimir ILYIN

Deputy Head of Department – Head of Department, JSC «VNIIAES»

E-mail: vailin@vniiaes.ru

Любовь АДАМЦЕВИЧ

Доцент кафедры ИСТАС, НИУ МГСУ, к. т. н.

E-mail: AdamtsevichLA@mgsu.ru

Lyubov ADAMTSEVICH

Ph.D., Associate Professor of the Department of ISTAS, NRU MGSU

E-mail: AdamtsevichLA@mgsu.ru

Аннотация. Объектом исследования являются образцы бетона, используемые при возведении ж/б конструкций ядерного острова АЭС с ВВЭР-1000, а основная цель работы заключается в исследовании свойств бетонов для формирования прогноза ресурса, оценки изменения прочностных, физических и структурных характеристик бетона ж/б конструкций, при воздействии различных сочетаний эксплуатационных факторов. Статья посвящена вопросам формирования научно-технического обоснования разработки моделей прогнозирования старения бетона на проектный и запроектный сроки эксплуатации железобетонных конструкций ядерного острова АЭС с ВВЭР 1000.

Ключевые слова: атомная энергетика, эксплуатация АЭС, модульное старение, дефекты бетона.

Abstract. The object of the study is concrete samples used in the construction of reinforced concrete structures of the nuclear island of nuclear power plants with VVER-1000, and the main purpose of the work is to study the properties of concrete to form a resource forecast, assess changes in the strength, physical and structural characteristics of concrete of reinforced concrete structures, with various combinations of operational factors. The article is devoted to the formation of a scientific and technical justification for the development of models for predicting the aging of concrete for the design and beyond design life of reinforced concrete structures of the nuclear island of nuclear power plants with VVER-1000.

Keywords: nuclear power, NPP operation, modular aging, concrete defects.



С ростом температуры увеличивается интенсивность деградации механических свойств и характеристик проницаемости бетона

Введение

В настоящее время в мире насчитывается свыше 190 атомных станций, на которых расположено 438 энергоблоков. Спроектировано по российским проектам с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР). и находится на этапе эксплуатации свыше 50 АЭС.

Основным строительным материалом строительных конструкций ядерного

острова АЭС является бетон, в этой связи актуальной становится задача определения особенностей старения и деградации бетона в разных режимах эксплуатации.

При этом несмотря на то, что свойства бетона при эксплуатации объектов промышленно-гражданского назначения являются значительно изученными, необходимо учитывать, что бетоны ряда конструкций ядерного острова эксплуатируются в условиях специфических воздействий, которые присутствуют только на объектах использования атомной энергии, например нейтронное излучение и повышенные температуры. В этой связи актуальным становится вопрос исследования аспектов, касающихся оценки и обоснования остаточного ресурса бетона ж/б конструкций, с учетом данных специфических воздействий.

Важным является и необходимость в сборе статистической информации о влиянии добавок и рецептов на старение бетона, собранной в период эксплуатации блоков, для обоснования возможности продления срока их эксплуатации, в соответствии с СТО 1.1.1.02.009.1548 «Обоснование срока службы строительных конструкций зданий и сооружений атомных станций». Кроме того, необходимо учитывать требования МАГАТЭ «Управление старением бетонных конструкций на атомных станциях».



Рис. 1. Образцы до испытаний

Объектом исследования являются образцы бетона, используемые при возведении ж/б конструкций ядерного острова АЭС с ВВЭР-1000, а основная цель работы заключается в исследовании свойств бетонов для формирования прогноза ресурса, оценки изменения прочностных, физических и структурных характеристик бетона ж/б конструкций, при воздействии различных сочетаний эксплуатационных факторов.

Полученные данные позволят сформировать научно-техническое обоснование разработки моделей прогнозирования старения бетона на проектный и запроектный сроки эксплуатации железобетонных конструкций ядерного острова АЭС с ВВЭР 1000.

Нужно учитывать, что бетоны ряда конструкций ядерного острова эксплуатируются в условиях специфических воздействий, которые присутствуют только на объектах использования атомной энергии

Материалы и методы исследования

Для проведения исследования для каждого состава бетона были изготовлены образцы, отвечающие требованиям ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Исследование проводилось с использованием материально-технической базы Научно-исследовательского института строительных материалов и технологий НИУ МГСУ.

Вопросам продления сроков эксплуатации строительных конструкций ядерного острова АЭС посвящено значительное количество публикаций и научно-исследовательских работ [1–4]. При этом проведённые авторами [5–14] исследования позволили сформировать вывод о том, что механизм радиационного изменения бетонов практически не связан с образованием в результате возникновения радиационных дефектов в кристаллической структуре минералов материала. При этом важнейшим процессом, протекающим под действием радиации, является процесс локального разогрева вещества в термических пиках, в которых температура кратковременно повышается на несколько сот градусов в результате протекания смещения атомов и поэтому происходят локальные термиче-

Наименование показателя, ед. изм.	Значение показателя		
Срок эксплуатации бетонных конструкций, лет	30	60	100
Соответствующая температура изотермического прогрева для старения бетона до указанного возраста, °С	100	130	250

Таблица 1. Температуры изотермического прогрева для старения образцов бетона

ские изменения. В таком случае, механизм воздействия радиации на бетон имеет одну природу с механизмом влияния на материал его нагревания без облучения.

В этой связи в рамках представленного исследования научно-техническая гипотеза заключается в предположении о возможности ускорения процесса старения бетона за счет применения специального режима циклических температурных воздействий.

Опираясь на научно-исследовательские работы [15–25], для моделирования старения образцов бетона, проводится изотермический прогрев образцов в течении 30 суток и установлены температурно-влажностные режимы, соответствующие нормальным условиям эксплуатации бетонных конструкций АЭС. Температуры изотермического прогрева для старения образцов бетона приведены в таблице 1.

Время равномерного подъема температуры до указанных в таблице значений рассчитывается исходя из максимальной скорости нагрева – 5 °С/мин.

При этом для каждого указанного возраста изготовлена своя серия образцов, а контрольными брались образцы, соста-

ренные до возраста 28 суток. В рамках статьи представлены средние значения контролируемых параметров.

Результаты

Для проведения модельного старения, имитирующего различные сроки эксплуатации, температуру и радиационное воздействие исследованы образцы бетона класса В30, применяемого при возведении железобетонных конструкций ядерного острова АЭС с реактором типа ВВЭР. Результаты физико-механических испытаний бетона на прочность при сжатии образцов-кубов В30 после выдерживания при t 160°С в течение 30, 60, 100 модельных лет представлены в таблице 2. В таблице 3 представлены результаты испытаний образцов на сжатие. Средние значения результатов экспериментов для определения прочности при сжатии по п. 7 ГОСТ 10180–2012 с учетом оценки соответствия по ГОСТ 18105–2018 представлены в таблице 3. На рис. 1 представлены образцы до испытаний, на рис. 2 – образец в испытательной машине до и после испытания.

Таблица 2. Результаты испытаний на прочность при сжатии образцов-кубов с классом по прочности В30 после выдерживания при t 100 °С, t 130 °С, t 250 °С в течение 30, 60, 100 модельных лет

Наименование образцов	Средняя плотность образца кг/м ³	Средняя плотность партии кг/м ³	Размеры образцов, мм	Средняя прочность на сжатие отдельных образцов R, МПа	Прочность на сжатие в партии образцов R _m , МПа
V30–100–0	2333	2333	100x100x100	47	47,6
V30–100–30	2295	2295	100x100x100	55,7	56,7
V30–100–60	2276	2277	100x100x100	59,1	59,4
V30–100–100	2298	2298	100x100x100	60,5	62,9
V30–130–0	2333	2333	100x100x100	47,1	47,6
V30–130–30	2282	2282	100x100x100	51,3	53
V30–130–60	2256	2256	100x100x100	56,2	58,7
V30–250–0	2333	2333	100x100x100	47,1	47,6
V30–250–60	2248	2248	100x100x100	48,6	48,7
V30–250–100	2226	2226	100x100x100	54	54

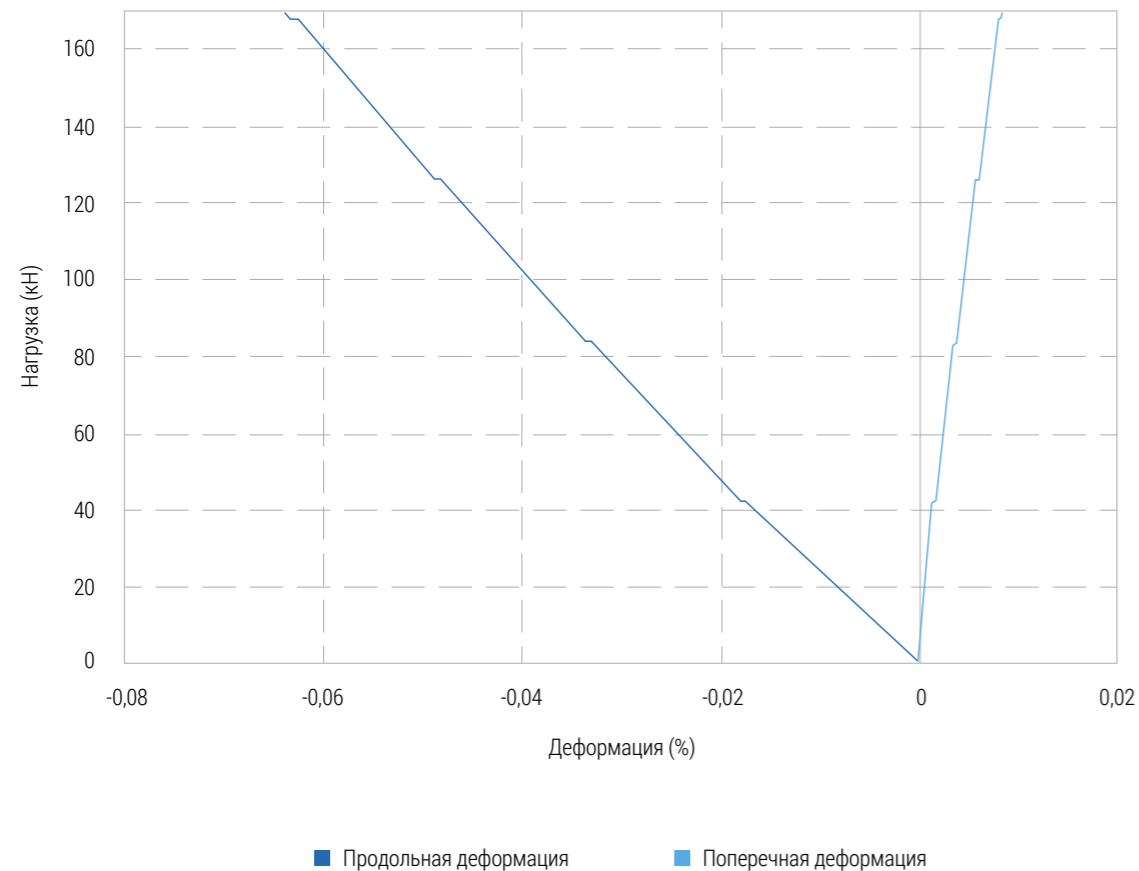
Таблица 3. Результаты испытаний образцов с классом по прочности В30 на сжатие

Маркировка образца	Разрушающая нагрузка (кН)	Среднее значение:		
		Призмная прочность (МПа)	Модуль упругости при сжатии (МПа)	Коэффициент Пуассона при сжатии
30/14	442,7	45,4	37830	0,18



Рис. 2. Образец в испытательной машине до и после испытания

Рис. 3. Нагрузка – продольная/поперечная деформация



Исследование микроструктуры образцов бетона

Исследование микроструктуры образцов бетона осуществлялось с использованием растрового электронного микроскопа. В качестве образцов использовались сколы бетона. Образцы исследовались до начала термического нагружения, после чего погружались в камеры, моделирующие различные температурные режимы (100 °С, 130 °С, 160 °С и 250 °С) и вновь исследовались через 30, 60 и 100 циклов модельного старения.

Результаты по каждому виду исследуемых образцов бетона представлены в виде графических снимков. Снимки подписаны в формате X-Y-Z A, B, где:

- X – класс бетона;
- Y – температура модельного старения;
- Z – число циклов модельного старения;

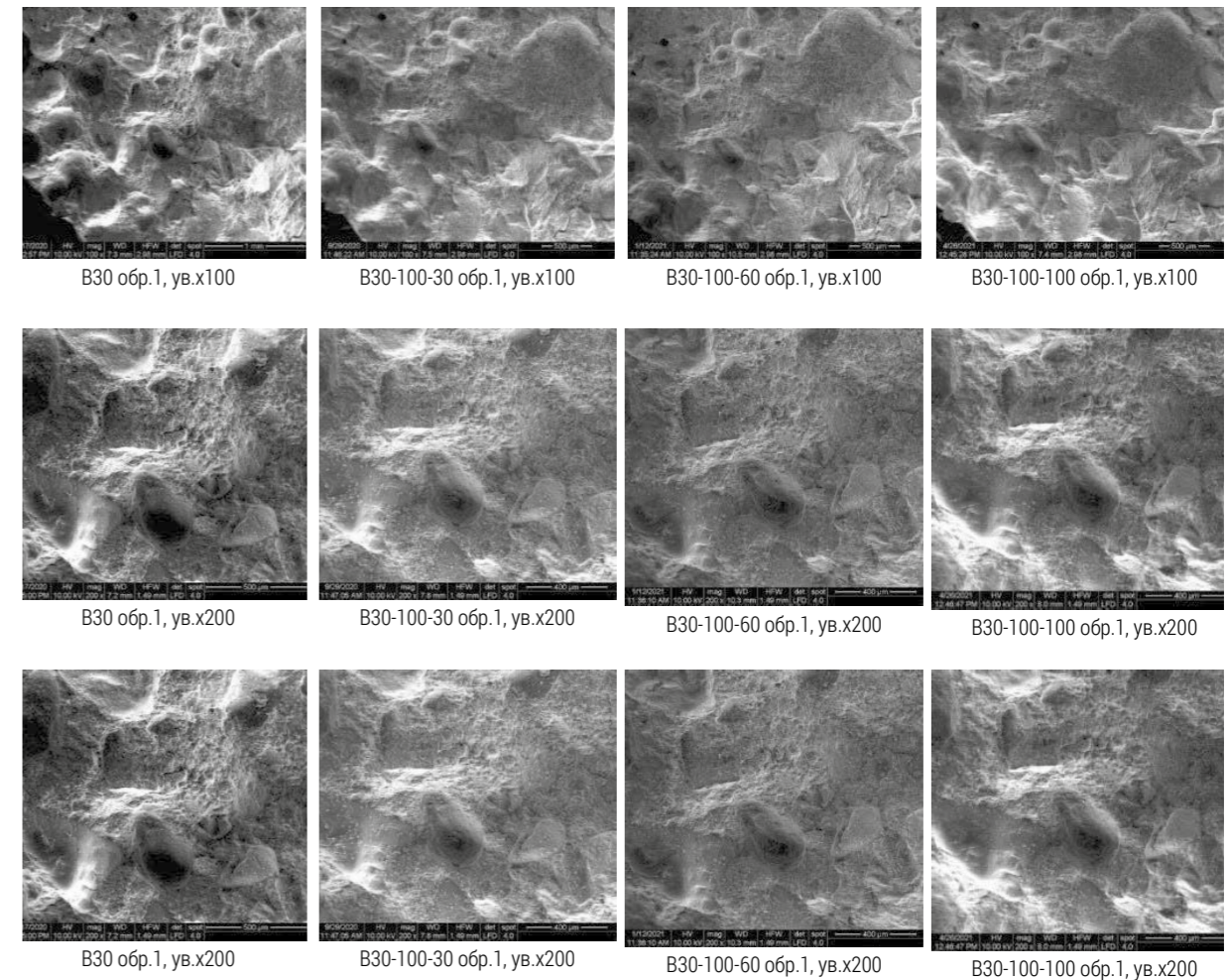
A – номер образца в серии;
B – увеличение, при котором производилась съемка.

Отсутствие значений Y и Z означает, что на снимке представлен контрольный образец до начала модельного старения. Результаты исследования для образцов из бетона класса В30 представлены на рис. 4.

Исследование образцов методом качественного рентгенофазового анализа

Для уточнения изменения структуры цементного камня при воздействии повышенных температур были проведены исследования методом качественного рентгенофазового анализа (РФА). Для чистоты эксперимента все испытания на различных сроках модельного старения проводились

Рис. 4. Результаты исследования для образцов из бетона класса В30



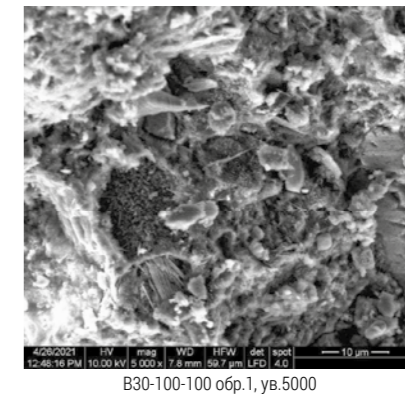
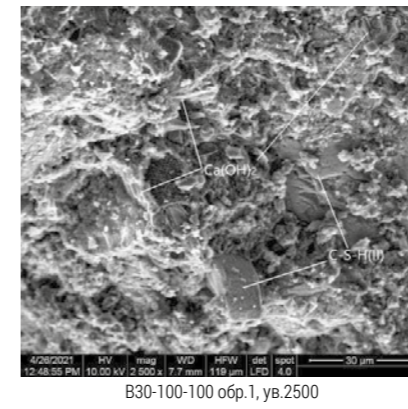
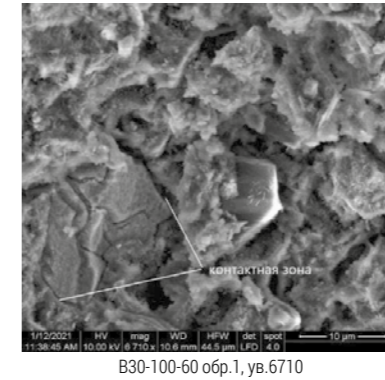
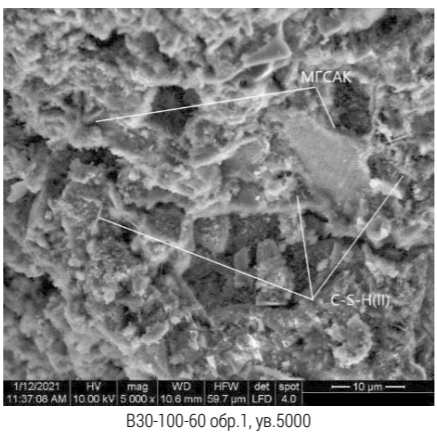
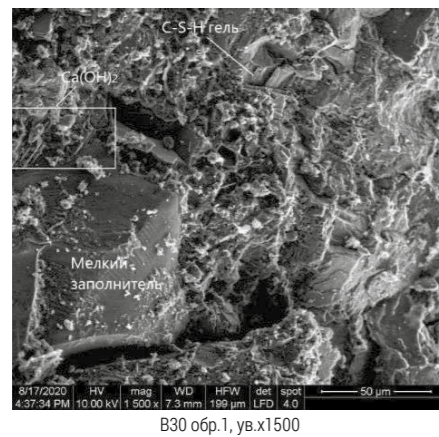
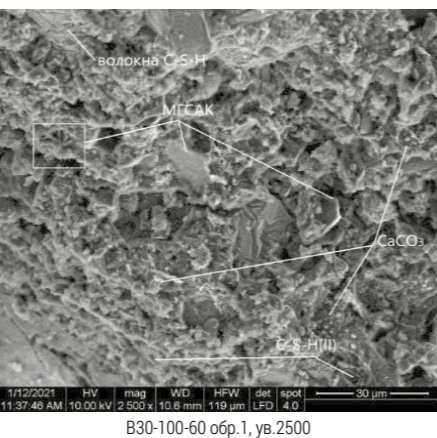
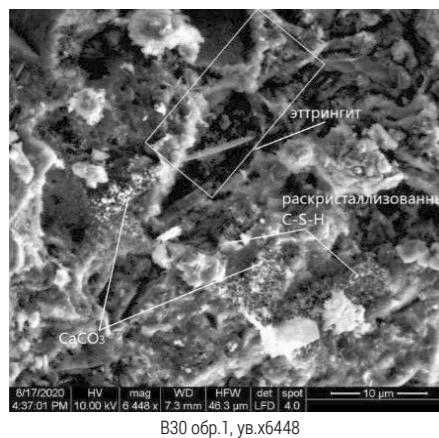
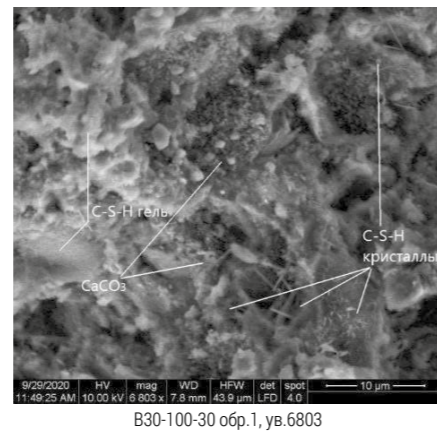
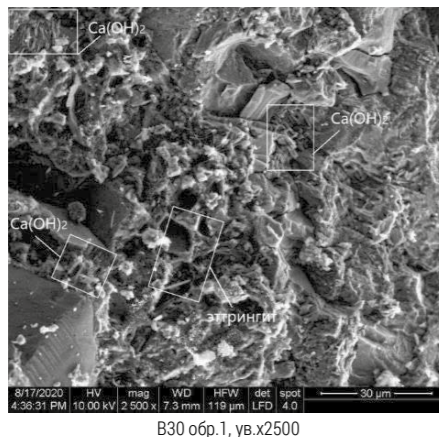
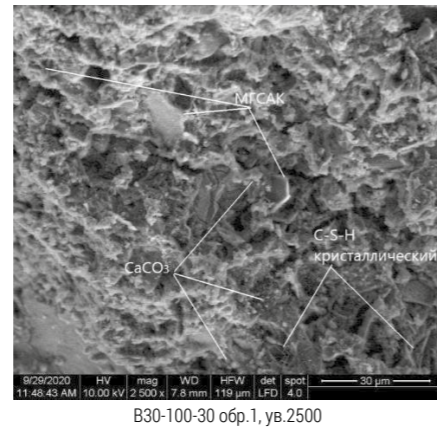
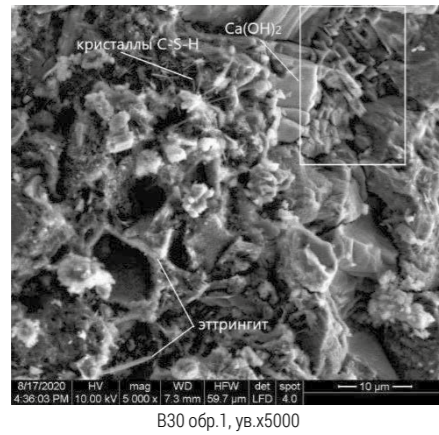


Рис. 4. (окончание) Результаты исследования для образцов из бетона класса В30

Таблица 4. Результаты фазового анализа образца В30 (обр. 1), при температуре 100 °С

Срок модельного старения, лет	Содержание, %													
	Фазы заполнителя						Фазы вяжущего			Продукты гидратации				
	Кварц	Кальцит	Доломит	Альбит	Биотит	Микроклин	Алит	Белит	Четырехкальциевый алюмоферрит	Ангидрит	Портландит	Этtringит	МГСАК	Аморфная фаза
SiO ₂	CaCO ₃	MgCO ₃ , CaCO ₃	NaAlSi ₃ O ₈	K(Mg, Fe) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀](OH, F) ₂	KAISi ₃ O ₈	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ AF	CaSO ₄	Ca(OH) ₂	3CaO·Al ₂ O ₃ ; 3CaSO ₄ ·32H ₂ O	3CaO·Al ₂ O ₃ ; CaSO ₄ ·12H ₂ O		
0	46,7	7,7	2,2	6,9	3,6	7,8	4,6	4,4	2,3	0,8	4,3	0,7	0	8
30	48,6	8,3	0,5	8,9	3,9	8,9	3,5	3,4	2,3	0,9	3	0	0,5	7,3
60	48,9	9,3	0,1	9,6	2,7	9,3	3,2	3,2	2,2	0,9	2,9	0	0,8	6,9
100	45,8	13,7	0,1	10	2,9	9,5	3,1	3	1,6	1,2	2,5	0	0,8	5,8

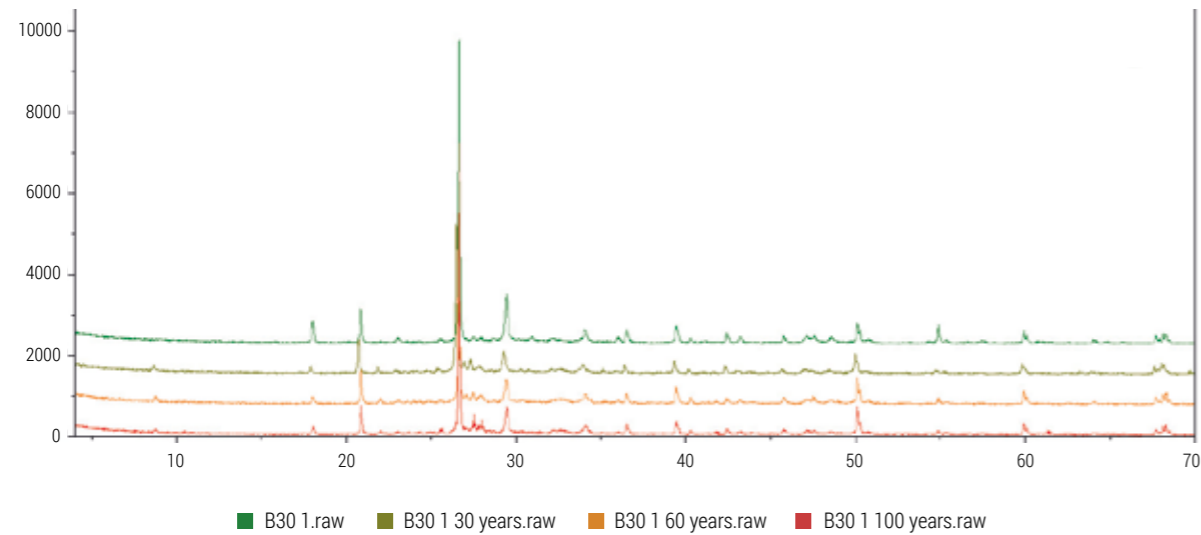


Рис. 5. Сравнительная дифрактограмма образца В30 при 100 °С

на одних и тех же образцах, отобранных из стандартного образца бетона кубической формы с длиной ребра 100 мм отдельно под каждый температурный режим модельного старения и выдерживаемых в климатических камерах вместе с образцами бетона в стеклянных бюксах. Проведение исследований методом РФА на одних и тех же образцах в разные сроки модельного старения важно для обеспечения идентичности состава образцов сравнения и исключения влияния факторов вероятностного характера при постановке эксперимента.

Результаты фазового анализа показали, что в образцах, выдержанных при модельных 30 циклах с температурой 100 °С отмечается количественное и качественное изменение фазового состава. Количественные изменения характеризуются снижением содержания портландита за счет взаимодействия с CO_2 воздуха и увеличением содержания карбоната кальция, а также полным переходом этtringита в МГСАК и снижением аморфной фазы вследствие частичного их обезвоживания. Следует отметить продолжение гидратации клинкерных минералов C3S и C2S, при сохранении содержания C4AF.

Верхнебаканский цементный завод

Источник: Leonid_Eremeychuk / depositphotos.com

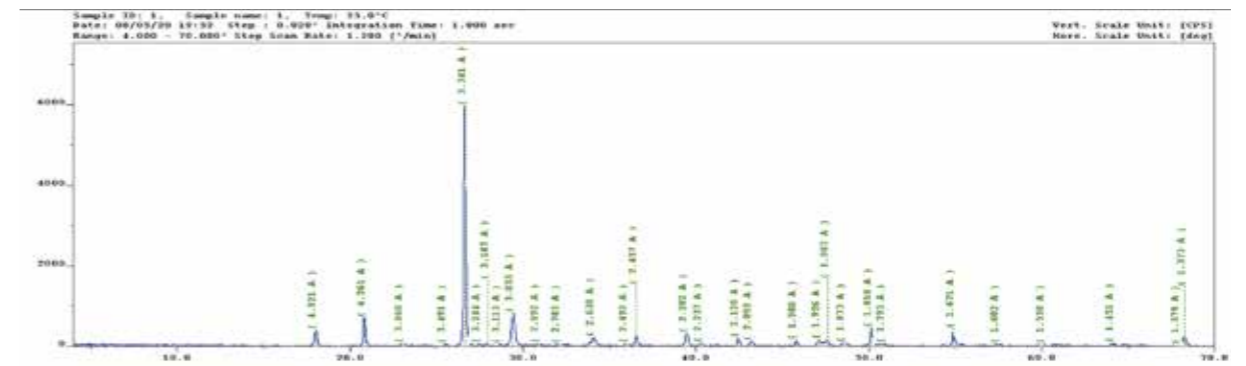


Рис. 6. Зарегистрированная дифрактограмма образца В30, 0 лет при 100 °С

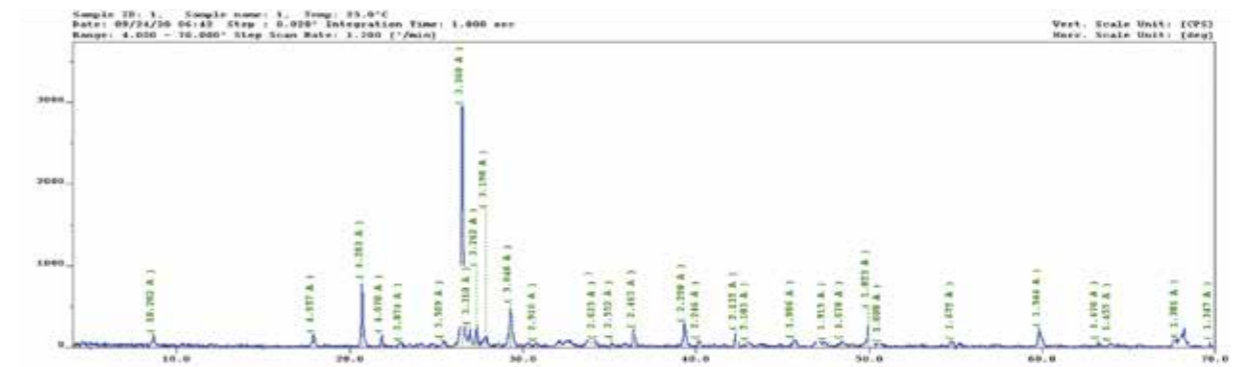


Рис. 7. Зарегистрированная дифрактограмма образца В30, 30 лет при 100 °С

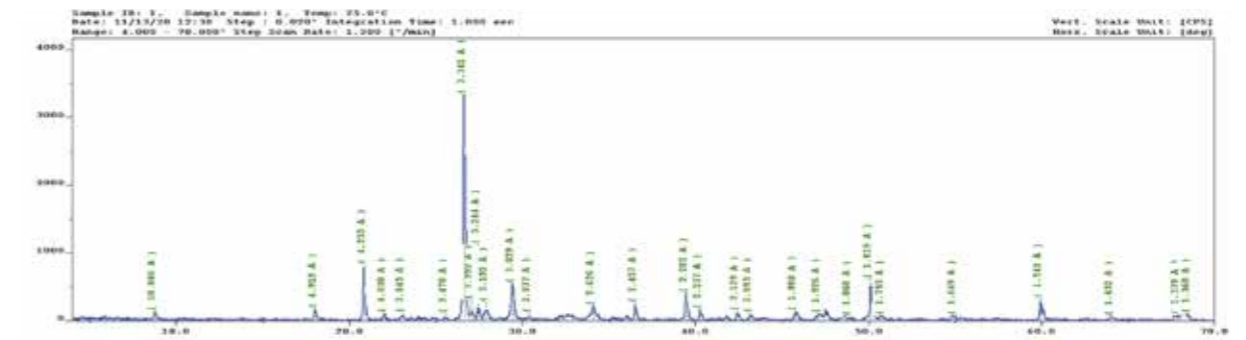


Рис. 8. Зарегистрированная дифрактограмма образца В30, 60 лет при 100 °С

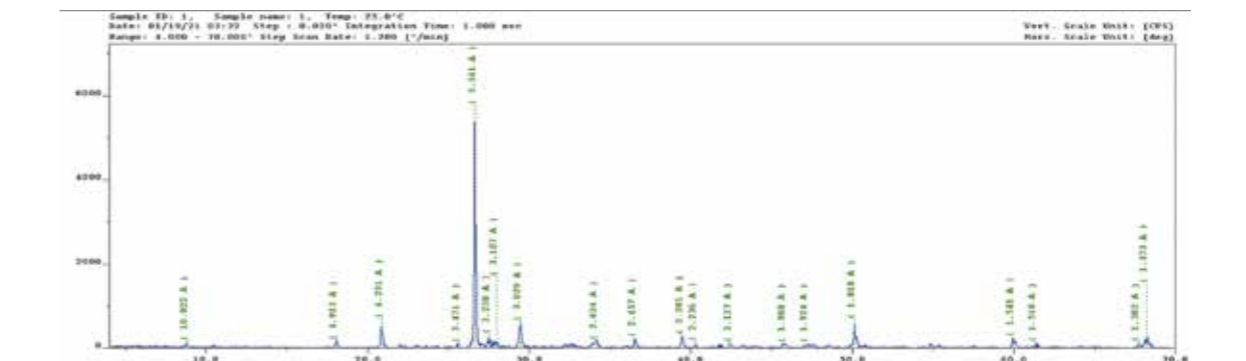


Рис. 9. Зарегистрированная дифрактограмма образца В30, 100 лет при 100 °С

Для образцов выдержанных при модельных 60 циклах с температурой 100 °С продолжается количественное изменение фазового состава, без качественных изменений, в части снижения содержания портландита, за счет взаимодействия с CO₂ воздуха и увеличения карбоната кальция, а также участия портландита в образовании МГСАК. Отмечено дальнейшее снижение содержания аморфной фазы вследствие частичного их обезвоживания и существенное замедление гидратации клинкерных минералов C3S и C2S на фоне гидратации C4AF, что способствует росту содержания МГСАК.

С увеличением до 100 модельных циклов с температурой 1000 °С продолжается количественное снижение в образцах содержания фаз портландита и аморфной фазы при увеличении фаз карбоната кальция и МГСАК. Отмечена практически полная остановка процессов гидратации клинкерных минералов C3S, C2S на фоне продолжающейся гидратации C4AF.

Результаты исследования изменения фазового состава хорошо согласуются с микроструктурным анализом, с увеличением количества модельных циклов наблюдается рост степени разуплотнения микроструктуры образцов бетона.



Портландит
Источник: wikiwand.com

Рост дефектов микроструктуры, обусловленный изменением количественного и качественного фазового состава образцов в результате воздействия температурных модельных циклов существенно снижает физико-механические характеристики, модуль упругости, а также во-

донепроницаемость и сопротивление воздухопроницаемости исследованных образцов.

Выводы

Полученные результаты физико-механических и деформационных характеристик свидетельствуют о том, что с ростом температуры и продолжительности модельных циклов при воздействии на бетон увеличивается интенсивность деградации физико-механических, деформационных свойств и характеристик проницаемости бетона.

Результаты исследования микроструктуры и минералогического состава бетона показали увеличение дефектов микроструктуры образцов с ростом продолжительности циклических температурных воздействий. Изменение количественного и качественного фазового состава отмечено при 30 модельных циклах с температурой 100 °С, для 60 и 10 модельных циклов с температурой 100 °С качественные изменения фазового состава отсутствуют, при этом количественные изменения обусловлены сокращением количества портландита и аморфной части и ростом содержания ГСАК и карбоната кальция. Данные

Необходимо проводить сбор статистической информации о влиянии добавок и рецептур на старение бетона в период эксплуатации блоков для обоснования возможности продления срока их эксплуатации

факты указывают на рост микродефектов и ускорение процессов карбонизации, что способствует снижению проектных характеристик бетона, ускорению коррозии арматуры железобетонных конструкций и негативно отражается на долговечности бетона.

Результаты проведенных исследований показали, что температурные воздействия, в том числе, возникающие при воздействии радиационного излучения, необходимо учитывать при разработке программ управления старением блоков АЭС, подверженных воздействию повышенных температур и/или радиации.

Использованные источники

1. Потапов В. В., Логинов А. М., Ильин В. А., Коломиец В. Г., Пустовгар А. П. Определение ресурсных характеристик защитной оболочки как одна из задач управления жизненным циклом АЭС с ВВЭР-1000 // *Атомная энергия*. Т. 119. № 6, 2015. С. 308–310.
2. Потапов В. В., Логинов А. М., Ильин В. А. и др. Обследование, оценка технического состояния и срока службы элементов защитной оболочки (круговой консоли полярного крана и бассейна выдержки отработанного топлива) энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС // *Энергетическая стратегия*. № 3(45), 2014. С. 30.
3. Потапов В. В., Ильин В. А., Гошко А. И. Аварии и инциденты как инструмент поиска мест и причин отказов защитных оболочек на АЭС мира // *Научно-технический журнал «Контроль. Диагностика»*. № 11(257), 2019. С. 14–19.
4. Потапов В. В., Логинов А. М., Ильин В. А. и др. Управление ресурсными характеристиками элементов АЭС // *М.: Инновационное машиностроение*, 2015.
5. Корневский В. В. Влияние облучения на бетоны и их составляющие: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1974.
6. Дубровский В. Б., Лавданский П. А., Пергаменчик Б. К., Соловьев В. Н. Радиационная стойкость материалов: Справочник // Москва: Атомиздат, 1973.
7. Дубровский В. Б. Радиационная стойкость строительных материалов // Москва: Стройиздат, 1977.
8. Дубровский В. Б., Корневский В. В., Пергаменчик Б. К., Сугак Е. Б., Музалевский Л. П. Радиационно стойкие бетоны для защиты реакторов // *Радиационная безопасность и защита АЭС*. № 4, 1980. С. 240.
9. Дубровский В. Б., Денисов А. В., Корневский В. В., Музалевский Л. П., Сугак Е. Б. Влияние реакторного излучения на бетон // *Радиационная безопасность и защита АЭС*. № 9, 1985. С. 237–242.
10. Пустовгар А. П., Лавданский П. А., Журавлев А. В., Есенов А. В., Медведев В. В., Веденин А. Д. Тепловыделение гидратации цемента серпентинитового бетона // *Научно-технический вестник Поволжья*. № 5, 2014. С. 285–287.
11. Medvedev V., Pustovgar A. Influence of Chemical Additives on Radiation Stability of Concrete – Theoretical Basis and Evaluation Method // *Applied Mechanics and Materials*, № 725-726, 2015. pp. 377–382.
12. Веселкин А. П. Исследование защитных свойств бетонов разных составов // *Вопросы физики защиты реакторов*. Москва: Атомиздат, 1974. С. 230.
13. Денисов А. В., Медведев В. В., Пустовгар А. П., Соловьев В. Н. Результаты оценки радиационной стойкости цементного камня с добавками наиболее перспективными для применения в бетонах с целью ускорения производства бетонных работ при строительстве атомных станций: материалы // Москва: Стройиздат, 1977.
14. Samarin, Use of Concrete as a Biological Shield from Ionising Radiation // *Energy and Environmental Engineering*. № 1(2), 2013. С. 90–97.
15. Ершов В. Ю. Радиационная стойкость портландцементного камня с химическими и минеральными добавками: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 1992.
16. Медведев В. В. Повышение радиационной стойкости бетонов за счет применения эффективных суперпластификаторов: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2015.
17. Есенов А. В. Эффективный серпентинитовый бетон «сухой» радиационно-тепловой защиты реактора ВВЭР: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2014.
18. Дубровский В. Б., Лавданский П. А., Пергаменчик Б. К., Соловьев В. Н. Радиационная стойкость материалов: Справочник // Москва: Атомиздат, 1973.
19. Дубровский В. Б. Радиационная стойкость строительных материалов. Москва: Стройиздат, 1977.
20. Дубровский В. Б., Корневский В. В., Пергаменчик Б. К., Сугак Е. Б., Музалевский Л. П. Радиационно стойкие бетоны для защиты реакторов // *Радиационная безопасность и защита АЭС*. № 4, 1980. С. 240.
21. Музалевский Л. П. Прогнозирование степени изменения прочности и радиационных деформаций бетона // *Защита от ионизирующих излучений ядерно-технических установок*. Тбилиси, 1985.
22. Дубровский В. Б., Денисов А. В., Музалевский Л. П., Сугак Е. Б. Результаты оценки радиационных изменений бетонов на различных заполнителях для выбора бетонов радиационной защиты // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Атомно-водородная энергетика и технология»*. № 1, 1988. С. 76–79.
23. Денисов А. В., Дубровский В. Б., Музалевский Л. П. Закономерности и расчетные значения радиационных изменений бетонов на различных заполнителях // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Проектирование и строительство»*. № 3, 1990. С. 68–72.
24. Виноградов Б. Н., Дубровский В. Б., Сугак Е. Б. Фазовый состав и структура облученного портландцементного камня // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Проектирование и строительство»*. № 2(7), 1980. С. 34–39.
25. Поспелов В. П., Миренков А. Ф., Покровский С. Г. Бетоны радиационной защиты атомных электростанций (разработка, исследование, внедрение). Москва: ООО «Август Борг», 2006. С. 652.

Обоснование нормативов показателей балансовой надёжности на современном этапе развития электроэнергетических систем России

Substantiation of standards for adequacy indicators at the present stage of development of electric power systems in Russia

Дмитрий КРУПЕНЁВ
Заведующий лабораторией надёжности
топливо- и энергоснабжения ИСЭМ СО
РАН, к. т. н., доцент
E-mail: krupenev@isem.irk.ru

Dmitry KRUPENEV
Head of the Laboratory of Reliability
of Fuel and Power Supply MESI SB RAS, Ph.D.,
assistant professor
E-mail: krupenev@isem.irk.ru

Николай БЕЛЯЕВ
Начальник отдела генерации
и прогнозирования спроса на
электрическую энергию и мощность АО
«НТЦ ЕЭС», к. т. н.
E-mail: krupenev@isem.irk.ru

Nikolay BELYAEV
Head of the Department of Generation and
Forecasting of Demand for Electricity and
Capacity of JSC «STC UPS», Ph.D.
E-mail: krupenev@isem.irk.ru

Вадим ЛОКТИОНОВ
Старший научный сотрудник ИСЭМ СО
РАН, к. э. н.
E-mail: krupenev@isem.irk.ru

Vadim LOKTIONOV
Senior researcher, Ph.D.
E-mail: krupenev@isem.irk.ru

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы обоснования нормативных значений показателей балансовой надёжности электроэнергетических систем (ЭЭС), которые используются при определении уровня резервирования генерирующей мощности, а также структуры и пропускной способности линий электропередачи основной сети. Предлагается комплексная методика обоснования нормативного уровня вероятности бездефицитной работы. Комплексность методики заключается в применении многоаспектного подхода, который включает в себя последовательность шагов, корректирующих нормативные значения вероятности бездефицитной работы.

Ключевые слова: балансовая надёжность, вероятность бездефицитной работы, норматив, резерв мощности, структура электрических сетей.

Abstract. The article deals with the issues of substantiating the normative values of the indicators of adequacy of electric power systems (EPS), which are used in determining the level of redundancy of generating capacity, as well as the structure and capacity of power transmission lines of the main network. A comprehensive methodology is proposed for substantiating the normative level of probability of deficit-free operation. The complexity of the methodology lies in the application of a multi-aspect approach, which includes a sequence of steps that correct the normative values of the probability of a deficit-free operation.

Keywords: adequacy, probability of deficit-free operation, standard, power redundancy, structure of electrical networks.



Даже при формализованной методике определения нормативов балансовой надёжности достоверность исходной информации является главным вопросом

Введение

В российских условиях планирование развития электроэнергетики осуществляется при разработке документов перспективного развития электроэнергетики. Такими документами являются:

- генеральная схема размещения объектов электроэнергетики (формируется на 18 лет с актуализацией 1 раз в 3 года);

- схема и программа развития электроэнергетических систем России (ежегодно формируется на 6 лет).

Разработка представленных документов касается только основной структуры электроэнергетических систем (ЭЭС), в которую не входит распределительная сеть. Потребителями энергии в этом случае считаются шины низкого напряжения понижающих подстанций основной сети. В основные задачи, решаемые при разработке приведенных документов, входят задача определения требуемого уровня генерирующей мощности и ее размещения в энергосистеме, а также задача формирования структуры основной сети и определения пропускных способностей электрических связей. Решение этих задач направлено на обеспечение требуемой надёжности электроснабжения потребителей.

Существует несколько подходов к учету требований по обеспечению надёжности электроснабжения при планировании развития энергосистем [2–5 и др.]:

- учет надёжности при минимизации суммы ущерба, возникающего в случае низкой надёжности ЭЭС, и приведенных затрат на ввод резервного энергетического оборудования;
- учет надёжности в виде нормативного значения одного из показателей, характеризующих надёж-

ность электроснабжения, который выступает в роли ограничения при минимизации приведенных затрат на ввод резервного энергетического оборудования;

- максимизация показателя надёжности электроснабжения потребителей при ограниченных ресурсах на ввод резервного энергетического оборудования.

Кроме учета двух критериев, надёжности и экономичности, может использоваться и большее количество критериев [6].

Как в России, так и в иностранных государствах на протяжении истории развития энергосистем вопросу обеспечения требуемого уровня надёжности электроснабжения уделялось большое внимание. В отечественной практике длительное время считалось, что для обеспечения требуемого уровня надёжности энергосистемы резерв мощности должен быть не менее 10 % от максимума нагрузки и не менее мощности самого крупного агрегата. В [7] было представлено аналитическое выражение для определения нормативного значения вероятности дефицита мощности в энергосистеме, на основании которого позже было определено [8], что для условий развития отечественной энергосистемы вероятность бездефицитной работы (ВБР) должна быть не ниже 0,996. В настоящее время это значение норматива вероятности бездефицитной работы утверждено в российской электроэнергетике [9].

В практике обоснования нормативных значений балансовой надёжности за рубежом используются различные показатели. Наиболее широкое применение в качестве норматива балансовой надёжности ЭЭС получил показатель ожидаемого числа дней дефицита мощности (LOLE), преиму-

В разных странах нормативное значение LOLH принимает разные величины от 2,4 до 3 час/год. Что касается норматива LOLE, то во многих энергосистемах США он равен 0,1 суток/года



Подстанция
Источник: depositphotos.com

щественно он применяется в Северной Америке и Европе [10–12]. Это один из основных рассматриваемых показателей для применения в странах, где норматив ещё находится на стадии обсуждения (Индия, Китай и др.). Такие показатели как ожидаемая величина недопоставленной энергии (EUE) и относительная величина недопоставленной энергии (RUE) используются значительно реже. В Северной Америке EUE используется в Приморских провинциях Канады (NPCC–Maritimes), в Европе в Испании. В Австралии (и некоторых странах Южной Америки) RUE используется как основной или вторичный показатель балансовой надёжности энергосистемы. Ущерб от недопоставки электроэнергии (VOLL) используется при планировании баланса мощности в Новой Зеландии. В странах Южной Америки расчёт показателей балансовой надёжности не производится, качество поставки электроэнергии оценивается с помощью показателей надёжности электроснабжения. В Бразилии, например, принят комплексный критерий SIN, включающий в себя следующие показатели: базовая устойчивость сети (RRB), длительность прерывания нагрузки (DREQ), частота прерывания нагрузки (FREQ), недопоставка электроэнергии (ENS). Уругвай в качестве основных показателей использует среднюю частоту прерываний для каждого потребителя (FCA) и общее среднее время прерываний для каждо-

го потребителя (TCA). Наиболее схожим с вероятностью бездефицитной работы по характеру определения показателем является LOLH. В различных странах его нормативное значение принимает разные величины от 2,4 до 3 час/год. Что касается норматива LOLE, то во многих энергосистемах США он равен 0,1 суток/года.

Целью статьи является представление методики обоснования нормативной величины вероятности бездефицитной работы, которую целесообразно использовать на современном этапе развития российской электроэнергетики. На практике, нормативные величины вероятности бездефицитной работы должны регулярно (к примеру, один раз в шесть лет, в рамках разработки генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики [1]) обновляться с применением предлагаемой методики.

Методика определения нормативного значения вероятности бездефицитной работы

Нормативы надёжности должны иметь комплексное обоснование. При обосновании нормативов необходимо учитывать баланс интересов участников рынка электроэнергии и мощности. При этом процедура определения нормативов балансовой надёжности должна быть прозрачна и формализована. Следует учесть, что нормирование балансовой надёжности имеет определённые социально-экономические последствия:

- необоснованно высокий уровень балансовой надёжности приводит к избыточной величине генерирующих и сетевых резервов, что ведет к повышению цен и тарифов и переплате на рынке мощности, хотя, при существовании одновременно рынка мощности и рынка электроэнергии, эта переплата будет частично компенсироваться снижением цен на рынке электроэнергии;
- низкий уровень балансовой надёжности приводит к увеличению вероятности аварий в энергосистемах, в том числе и системных аварий, приводящих к значительному ущербу.

Даже при формализованной методике определения нормативов балансовой надёжности достоверность исходной ин-

формации является важнейшим вопросом. Для решения этого вопроса необходимо отладить процесс по сбору актуальной информации. Все субъекты электроэнергетического рынка, участвующие в подготовке такой информации, должны понимать, что искажение реальных исходных данных в дальнейшем приведет к искажению технических решений и рыночных сигналов и отрицательно отразится на всем процессе развития энергосистем. Здесь, прежде всего, подразумевается информация о реальных ущербах у потребителей в случае ограничения поставки мощности и электроэнергии и реальных затратах на ввод и эксплуатацию энергетического оборудования.



Неконтролируемое подключение к сетям
Источник: depositphotos.com

Неизбежная неопределенность технологического развития ЭЭС на долгосрочную перспективу, особенно в рыночных условиях, делают целесообразным применение нормативов балансовой надёжности при планировании развития. На каждом этапе планирования необходимо использовать достоверную информацию, адекватные математические модели и методы, так как затраты на обоснование норматива балансовой надёжности существенно меньше затрат при ошибке в прогнозировании развития на основании этих нормативов.

Как отмечено во введении, в отечественной практике в качестве норматива балансовой надёжности получила

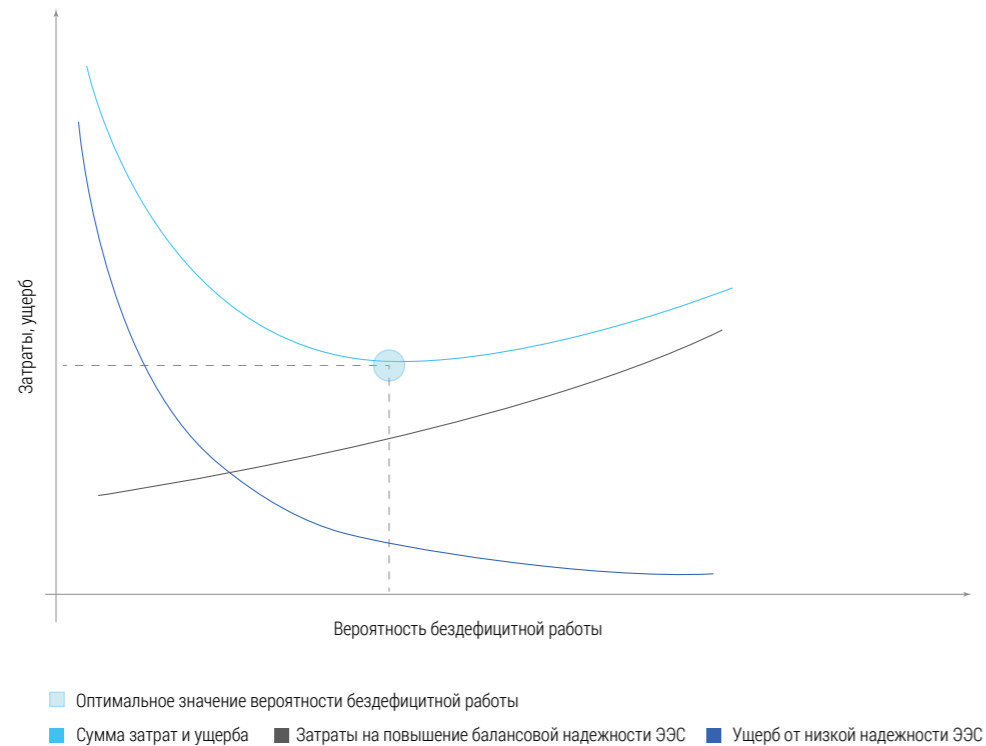


Рис. 1. Зависимость суммы затрат на повышение балансовой надёжности и ущерба от низкой надёжности от вероятности бездефицитной работы

применение вероятности бездефицитной работы [7]. Этот показатель является чувствительным к изменениям в структуре ЭЭС. По сути вероятность бездефицитной работы может трактоваться как доля времени бесперебойного снабжения потребителей за рассматриваемый период. Именно обоснование его нормативных значений представлено далее в статье.

Нормирование показателей балансовой надёжности предлагается осуществлять на основании оценки ряда аспектов, которые можно систематизировать и представить единой методикой (основа такого подхода представлена в [2, 5]). Рассматриваются следующие аспекты:

1. Нормирование на основе экономических оценок.
2. Нормирование на основе согласования надёжности технологических звеньев ЭЭС.
3. Нормирование на основе экспериментальных исследовательских расчетов.
4. Нормирование на основе прошлого опыта.
5. Нормирование на основе экспертных оценок.

Итоговый результат по принятию норматива балансовой надёжности должен быть основан на учёте максимального количества представленных аспектов, причем окончательный выбор норматива должен быть сделан на основании самой «жесткой» оценки. Необходимым условием при этом является обязательный учет экономического аспекта.

Смысл экономического аспекта определения норматива ВБР сводится к необходимости сопоставления материального ущерба для экономики от нарушений электроснабжения с затратами в энергосистему для снижения этого ущерба [2, 5, 7] (интерпретация показана на рис. 1).

При определении затрат на повышение надёжности и экономического ущерба от дефицита электроэнергии и, в последствии, при обосновании приемлемого уровня резервирования генерирующей мощности, структуры и пропускной способности линий электропередачи передающей сети необходимо принимать во внимание ряд особенностей. В первую очередь следует понимать, что ущерб от дефицита электроэнергии дает пролонгированный результат. Можно выделить первоначальный прямой

ущерб от дефицита электроэнергии и отложенный ущерб в виде упущенных возможностей. То есть те экономические активы, которые не были произведены, или были произведены позже, не дадут прироста капитала, способного участвовать в обеспечении экономического роста. Пролонгированные убытки тем выше, чем выше темп роста экономики.

С другой стороны, при необоснованном вложении средств в ЭЭС и создании необоснованного количества резервных мощностей (элементов) экономика не только консервирует капитал в размере сделанных инвестиций, но и теряет потенциальную прибыль, которую экономические агенты получили бы в случае инвестирования этих средств в активно используемые промышленные объекты. Данные неочевидные потери тем выше, чем выше средняя доходность капитала в экономике. Таким образом, на процесс формирования резервных мощностей оказывают влияние две силы, которые действуют разнонаправленно.

В общем случае при определении оптимального уровня надёжности ЭЭС необходимо находить компромисс между затратами на создание резервов и вероятными убытками в случае появления дефицита мощности и энергии. Можно предложить следующую целевую функцию, которая характеризует состояние между вложениями в резервы ЭЭС и вероятными убытками от дефицита мощности:

Повалившаяся опора ЛЭП
Источник: depositphotos.com



Неопределенность технологического развития ЭЭС на долгосрочную перспективу, особенно в рыночных условиях, требует применения нормативов балансовой надёжности при планировании развития

$$Capex_r + \sum_{t=1}^T \frac{Opex_{rt}}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{PR_t}{(1+r)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{SDD_{et}(P_t)(1+g)^{T-1}}{(1+r)^t} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где: $Capex_r$ — капитальные затраты на создание резервов в ЭЭС, у. е.; $Opex_{rt}$ — эксплуатационные (операционные) затраты на поддержание работоспособного состояния резервного оборудования, у. е.; PR_t — упущенная прибыль за t -й период, которая была бы получена в случае производительного использования затрат, у. е.; T — количество лет, анализируемого периода (может быть принято 8–10 лет); r — ставка дисконтирования; SD — удельный ущерб в экономике, у. е./кВт·ч; $D_{et}(P)$ — функция недоотпуска электроэнергии в t -й период, зависящая от P_t — вероятность бездефицитной работы ЭЭС в t -й период; g — темп роста экономики.

Из выражения (1) видно, что в процессе обоснования оптимального уровня резерва генерирующей мощности учитывается множество технических и экономических параметров. Большинство из этих параметров можно вычислить, используя статистические и прогнозируемые данные о функционировании ЭЭС.

Если остановиться на определении норматива вероятности бездефицитной работы, то по сути необходимо определить время, в течении которого у потребителей электроэнергии возможно возникновение дефицита мощности и недоотпуска электроэнергии и ущерб от них будет равен вложениям в энергосистему затрат на компенсацию этого ущерба. Отношение этого времени, а именно количества часов, к годовому числу часов будет формировать норматив вероятности бездефицитной ра-

При определении оптимального уровня надёжности ЭЭС необходимо находить компромисс между затратами на создание резервов и вероятными убытками в случае появления дефицита мощности и энергии

боты. Продолжительность времени, в течение которого у потребителей электроэнергии будет возникать дефицит мощности можно оценить, используя экономическую интерпретацию. Для обоснования норматива вероятности бездефицитной работы необходимо соотнести величину ущерба от недопоставки одного кВт·ч энергии с затратами в резервы мощности на получение одного кВт·ч энергии. Такая зависимость представлена в [7]:

$$P_{\text{норм}} = 1 - \frac{\text{Lisex}}{TSD}, \quad (2)$$

где: $P_{\text{норм}}$ – нормативная величина вероятности бездефицитной работы; Lisex – замыкающие приведенные затраты на создание и годовое содержание единицы генерирующей мощности, у. е./кВт·год; T – число часов расчетного периода, принимаемое 8760.

Замыкающие приведенные затраты на создание и годовое содержание единицы генерирующей мощности можно получить используя Capex и Opex .

$$\text{Lisex} = \text{Opex} + k\text{Capex}, \quad (3)$$

где: k – коэффициент экономической эффективности капитальных вложений.

На практике, во многих случаях, создание резервных генерирующих мощностей не гарантирует поставку электроэнергии потребителям, для этого необходимо строительство линий электропередачи. Если определение затрат на резервную генерирующую мощность является максимально понятным, то определение затрат на возможные сетевые вводы и эффект от ввода сетевых элементов не является столь очевидным [13]. Затраты на создание дополнительных сетевых мощностей будут прямо

пропорциональны затратам на создание генерирующих мощностей. В рассматриваемом случае они могут быть оценены в размере 5 % от затрат на создание генерирующих мощностей.

Если остановиться на анализе ущерба от недоотпуска электроэнергии, то определение этой характеристики на практике является сложной задачей. В энергосистеме присутствует множество потребителей с различной величиной ущерба при возникновении дефицита мощности и недоотпуска электроэнергии. К тому же, величина ущерба у каждого потребителя имеет нелинейную зависимость как по времени, так и по глубине дефицита мощности. При макроэкономическом анализе возможно несколько способов определения удельного ущерба. Первый основан на сборе, обработке и анализе статистических данных о реальных ущербах, возникающих в экономике при возникновении дефицита мощности и недоотпуска электроэнергии. Второй основан на оценке величины удельного ущерба, на основании внутреннего валового продукта страны и потребления электроэнергии за год используя следующее выражение [14]:

$$SD = \frac{\text{ВВП}}{W_{\text{год}}}, \quad (4)$$

где: ВВП – внутренний валовой продукт страны, руб.; $W_{\text{год}}$ – потребление электроэнергии за год в стране или регионе, кВт·ч.

Анализ работы электроподстанции
Источник: depositphotos.com



Аварийные работы по ремонту ЛЭП
Источник: depositphotos.com

Упущенная прибыль может быть определена на основании средней нормы доходности капитала в экономике. Среднюю норму доходности капитала в экономике можно найти аналитически, либо используя нормативы доходности по видам экономической деятельности, которые определяются ежегодно Федеральной налоговой службой Российской Федерации (ФНС РФ)¹. Упущенная прибыль окажет непосредственное влияние на инвестиции, вкладываемые в ЭЭС для повышения надёжности.

Учитывая пролонгированный эффект на период планирования развития ЭЭС и обоснования норматива вероятности бездефицитной работы зависимость (2) может быть представлена в следующем виде:

$$P_{\text{норм}} = 1 - \frac{\text{Lisex}}{TSD(1+g)^T}. \quad (5)$$

Экономический аспект нормирования показателей балансовой надёжности базируется на обосновании норматива с учетом затрат и эффектов для ЭЭС и конечного потребителя. Однако применение такого подхода к нормированию балансовой надёжности в современных условиях достаточно затруднено, в первую очередь из-за сложности получения однозначных оценок ущерба от дефицита мощности в ЭЭС в связи с многообразием потребителей и нели-

¹ Приложение № 4 к приказу ФНС России от 30.05.07 № ММ-3-06/333 (ред. от 10.05.2012).

нейными зависимостями ущерба от объема и продолжительности ограничения нагрузки потребителей. Именно поэтому при выборе норматива балансовой надёжности в развитых странах в настоящее время больше преобладает фактор растущей социальной значимости надежного электроснабжения, также сложно поддающийся количественной оценке.

ЭЭС представляют собой цепочку технологических звеньев, которые в смысле надёжности электроснабжения имеют последовательное соединение (хотя сама по себе ЭЭС обладает сложной структурой с различными видами соединений внутри). Основными технологическими звеньями являются: звено снабжения электростанций первичными энергоресурсами, звено генерации электроэнергии, звено передачи электроэнергии и звено распределения электроэнергии. Для обеспечения требуемого уровня надёжности электроснабжения необходимо, чтобы все звенья имели надёжность выше норматива.

Одним из альтернативных подходов к обоснованию норматива балансовой надёжности в современных условиях является нормирование на основании учета звена поставок первичного энергоресурса на электростанции ЭЭС. Одним из показателей балансовой надёжности является ожидаемый недоотпуск электроэнергии потребителям. В моделях расчета балансовой надёжности предполагается, что недоотпуск возникает вследствие отказов элементов ЭЭС или отклонений спроса на мощность от прогнозных значений. В то же время причиной недоотпуска электроэнергии от электростанций ЭЭС может являться и недопоставка первичного энергоресурса. Учитывая, что с позиций теории надёжности звенья топливоснабжения

Нормирование показателей балансовой надёжности на основе опыта эксплуатации ЭЭС предполагает ретроспективный анализ данных надёжности ЭЭС и оценку их приемлемости на перспективу

электростанций (здесь имеются в виду все первичные энергоресурсы), производства и передачи электроэнергии являются последовательными, величины указанных недоотпусков рационально уравнивать.

В общем случае предлагаемый подход может быть описан следующим образом. Пусть ΔW – суммарный объем недоотпуска электроэнергии от электростанций ЭЭС вследствие недопоставки первичного энергоресурса, который складывается из недоотпусков по электростанциям отдельных типов:

$$\Delta W = \sum_i \Delta W_i, \quad (6)$$



Работники подстанции
Источник: depositphotos.com

где: i – тип электростанций (АЭС, ТЭС, ГЭС и ВИЭ). $\Delta W_{АЭС}$ – определяется средне-статистической продолжительностью нахождения АЭС во внеплановых ремонтах:

$$\Delta W_{АЭС} = q_{АЭС} \cdot 8760 \cdot P_{АЭС}^r, \quad (7)$$

где: $q_{АЭС}$ – относительная продолжительность внеплановых простоев АЭС, 8760 – число часов в году, $P_{АЭС}^r$ – суммарная установленная мощность АЭС в ЭЭС. $\Delta W_{ТЭС}$ определяется среднестатистическим снижением производства электроэнергии на ТЭС вследствие перебоев в поставках топлива:

$$\Delta W_{ТЭС} = \sum_n k_n \cdot 8760 \cdot P_{ТЭС}^r, \quad (8)$$

где: k_n – коэффициент недоотпуска электроэнергии тепловой электростанцией n вследствие недопоставки топлива, 8760 – число часов в году, $P_{ТЭС}^r$ – установленная мощность тепловой электростанции n . $\Delta W_{ГЭС}$ определяется снижением производства электроэнергии на ГЭС в маловодный год:

$$\Delta W_{ГЭС} = W_{ГЭС}^{ср.а} - W_{ГЭС}^{м.а}, \quad (9)$$

где $W_{ГЭС}^{ср.а}$, $W_{ГЭС}^{м.а}$ – объем выработки электроэнергии на ГЭС в расчетных условиях среднеговодного и маловодного года соответственно. Аналогично может быть определена величина $\Delta W_{ВИЭ}$ для условий низкой обеспеченности первичным ресурсом (интенсивность солнечного излучения, ветровой активности и др. в зависимости от типа ВИЭ-электростанции).

Суммарный объем недоотпуска электроэнергии может быть снижен с учетом неравномерности графика нагрузки ЭЭС за счет перевода мощностей ТЭС, участвующих в балансе мощности ЭЭС и работающих в полупиковой или пиковой части графика нагрузки, в базовую часть графика нагрузки:

$$\Delta W_p = \Delta W - \sum_n \Delta T_n \cdot P_{ТЭС}^r, \quad (10)$$

где: ΔW_p – расчетный объем недоотпуска электроэнергии, ΔT_n – увеличение числа часов использования установленной мощности электростанции n за счет перевода генерирующего оборудования в базовый режим. Необходимо отметить, что величина ΔT_n должна быть подтверждена технической возможностью работы оборудования ТЭС и системы ее топливоснабжения в соответствующих режимах.

Расчетный объем недоотпуска электроэнергии может быть представлен как произведение объема ΔP^r ограничения нагрузки потребителей и его продолжительности $T_{огр}$:

$$\Delta W_p = \Delta P^r \cdot T_{огр}, \quad (11)$$

Минимальное $T_{огр}$, соответствующее ΔW_p , может быть получено в соответствии с выражением:

$$T_{огр} = \frac{\Delta W_p}{W} \cdot T_{max}, \quad (12)$$

где W – годовое потребление электроэнергии в ЭЭС, T_{max} – годовое число часов использования максимума электрической

нагрузки. Последнее выражение получено при следующих предположениях: $T_{огр}$ мало в сравнении с расчетным периодом (принимается равным году); дефицит мощности в ЭЭС, как правило, возникает в часы максимальной электрической нагрузки.

Тогда искомым рациональным норматив вероятности бездефицитной работы P будет равен:

$$P_{норм} = 1 - \frac{T_{огр}}{8760}. \quad (13)$$

Предлагаемый подход к нормированию показателя вероятности бездефицитной работы основан на принципе согласования

процесса. Из рис. 2 видно, что после значения вероятности бездефицитной работы 0,9997, затраты на повышение балансовой надежности начинают резко возрастать. Это является показателем того, рациональный уровень нормирования вероятности бездефицитной работы в данном случае 0,9997. Более подробно данный подход рассмотрен, в частности, в работах [6, 15].

Нормирование показателей балансовой надежности на основе опыта эксплуатации ЭЭС предполагает ретроспективный анализ данных, характеризующий надежность ЭЭС и оценку их приемлемости на перспективу. Стоит отметить, что данный подход широко

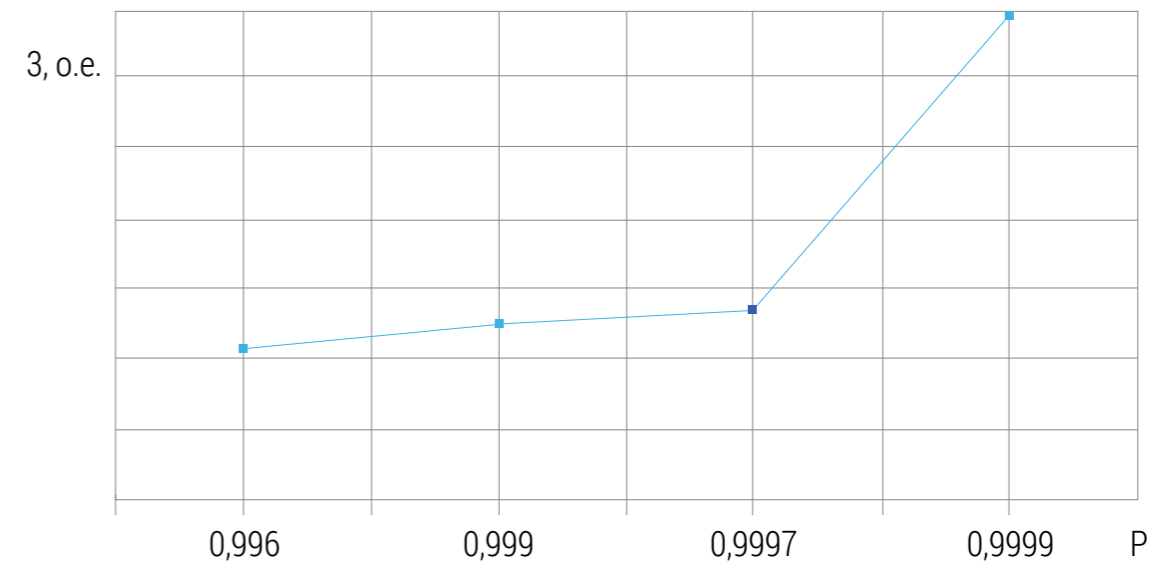


Рис. 2. Интерпретация процесса определения норматива вероятности бездефицитной работы на основании экспериментальных исследований

надежности последовательных технологических звеньев в ЭЭС. Очевидно, он может быть расширен с учетом как звена добычи топливно-энергетических ресурсов, так и звена генерации и передачи.

Нормирование показателей балансовой надежности на основе экспериментальных исследований сводится к тому, что исследуется зависимость затрат на повышение надежности от изменения показателей балансовой надежности. Как только вложение средств на повышение надежности в систему перестает давать ощутимый рост показателя балансовой надежности, так соответствующее значение показателя принимается за нормативное. На рис. 2 показана графическая интерпретация такого

применим в мировой практике нормирования показателей надежности. Для проведения подобной работы (обоснования на основании прошлого опыта) необходимо организовать процесс регулярной (ежегодной) оценки балансовой надежности ЭЭС за прошедший год, а также сбор и анализ всей фактической информации о состоянии оборудования основной структуры ЭЭС, проведении его плановых и аварийных ремонтов, о величине, продолжительности и причинах дефицита мощности в ЭЭС. Сравнение такой информации с результатами расчетов показателей балансовой надежности позволит оценить реальную корреляцию между ними и принять обоснованное значение вероятности безде-

Годы	Замыкающие приведенные затраты (Lisex), руб./кВт·год	Удельный ущерб с учётом пролонгированного эффекта (SD), руб./кВт·ч	Оценка значения нормативной величины вероятности бездефицитной работы
2010	8284,5	50,1	0,9811
2011	9229,3	63,8	0,9835
2012	10328,5	70,7	0,9833
2013	11544,4	75,5	0,9825
2014	13498,6	81,9	0,9812
2015	16003,4	86,6	0,9789
2016	17707,6	87,7	0,9769
2017	19061,5	93,2	0,9766
2018	20869,2	103,5	0,9769
2019	22580,9	109,1	0,9764
2020	24874,2	109,6	0,9741
2021	28309,2	131,6	0,9755
2022	33267,8	150,8	0,9748

Таблица 1. Результаты определения нормативной величины вероятности бездефицитной работы с 2010 по 2022 гг. (параметр T принят равным на уровне 10 лет)

фицитной работы для перспективных схем планирования развития ЭЭС.

Самым простым из представленных критериев является обоснование на основе экспертных оценок. Его суть заключается в применении опыта специалистов, проектирующих и эксплуатирующих ЭЭС, к определению нормативной величины вероятности бездефицитной работы. При этом к таким специалистам должен быть применён ряд критериев соответствия, основными из которых являются: понимание режимов работы энергосистем и их элементов, понимание процесса вероятностной оценки балансовой надёжности ЭЭС и интерпретации вероятности бездефицитной работы.

Определение нормативного значения вероятности бездефицитной работы на современном уровне развития электроэнергетики России

При практическом рассмотрении вопроса обоснования нормативного значения вероятности бездефицитной работы остановимся на ее экономической оценке.

В рамках экономического анализа проанализируем динамику изменения нормативного значения вероятности бездефицитной работы, используя выражение (2) и параметры для определения этого значения за ретроспективный период, а также определим значения норматива

для перспективного периода, основываясь на выражении (5).

Стоит отметить, что в СССР нормативный показатель вероятности бездефицитной работы был принят на уровне 0,996, что соответствовало $Lisex = 20$ руб./кВт·год, $DX = 0,6$ руб./кВт·ч.

В соответствии с [16] замыкающие Сарех на ввод резервной генерирующей мощности на 2010 год составили 53450 руб./кВт, Орех 123 руб./кВт в месяц. Коэффициент экономической эффективности капитальных вложений k для электроэнергетики может быть принят на уровне 0,12. Соответственно, замыкающие приведенные затраты на создание и годовое содержание единицы генерирующей мощности на уровне 2010 г. равны 7890 руб./кВт·год. Далее проведем учет влияния инфляции на период до 2022 г. (результаты представлены в таблице 1). Также для периода с 2010 по 2022 гг. определим удельную величину ущерба, используя ретроспективные значения ВВП России и статистику потребления электроэнергии в России (результаты представлены в таблице 1).

Как видно из таблицы 1 значения нормативной величины вероятности бездефицитной работы ниже подобного значения для отечественной энергосистемы обоснованного для условий развития энергетики в СССР. Это может быть обусловлено несколькими факторами: снижением энергоёмкости экономики и в следствие этого снижением значения удельного ущерба,

высокими затратами на ввод резервов в энергосистеме.

Экономическая оценка нормативной вероятности бездефицитной работы, представленная в таблице 1 может быть пересмотрена с учетом мультипликативного эффекта в экономике. В этом случае предлагается при оценке величины удельного ущерба по формуле (4) вместо показателя ВВП использовать суммарный валовой выпуск по экономике, который в период 2010–2022 гг. превышал значение ВВП в 1,7–1,8 раза. В этом случае оценка нормативного значения вероятности бездефицитной работы будет составлять от 0,9857 до 0,9907.

Очевидно, что полученные оценки могут рассматриваться лишь как нижний предел нормативного значения вероятности бездефицитной работы. Учитывая это, оценим применение других рассмотренных в статье подходов:

1. Обоснование с позиции уровня надёжности технологических звеньев ЭЭС. В структуре установленной мощности ЭЭС России в настоящее время преобладают тепловые электростанции, большинство из которых не имеют ограничений на режимы работы по условиям топливоснабжения, способных влиять на уровни балансовой надёжности ЭЭС. Это объясняется как наличием на электростанциях запасов резервного топлива (или двух независимых источников топливоснабжения), так и неравномерным графиком потребления, позволяющим разгружать (резервировать) часть генерирующего оборудования при снижении поставок (интенсивности) первичного энергоресурса. В связи с этим данный подход в текущих условиях не будет определяющим при обосновании норматива балансовой надёжности. При планируемом росте доли ВИЭ в структуре производства электрической энергии и уплотнении графика потребления мощности актуальность данного подхода возрастет.

2. Обоснование на основе экспериментальных исследовательских расчетов. Как показали расчеты, выполненные в работе [6], при моделировании ЭЭС одним узлом (т. н. концентрированная ЭЭС) приростные затраты на повышение уровня балансовой надёжности снижаются с ростом мощности ЭЭС. Для ЭЭС России нормативная вероятность бездефицитной работы исходя из данного подхода может быть установлена на уровне 0,999, что совпадает со значением, предложенным в [7]. При

этом указанное значение требует уточнения с учетом реальной многоузловой структуры ЭЭС России, что было сделано в [15], где нормативное значение вероятности бездефицитной работы была определена на уровне 0,9997.

3. Обоснование с позиции опыта эксплуатации энергосистемы. В последние годы баланс мощности ЭЭС России характеризовался большими избытками мощности, сформировавшимися в результате опережающего ввода новых генерирующих мощностей, в том числе в рамках программы договоров о предоставлении мощности. Учитывая это, фактический уровень балансовой надёжности в ЭЭС России в целом находился на высоких значениях. Сохранение такого уровня на перспективу потребует значительных затрат и не является целесообразным.

Деревенский трансформатор
Источник: depositphotos.com



4. Обоснование на основе экспертных оценок. Результаты опроса экспертов, выполненного при формировании проекта приказа [9], показали наличие среди них консенсуса относительно сохранения нормативного значения вероятности бездефицитной работы на уровне 0,996 в текущих условиях функционирования ЕЭС России.

Заключение

При планировании развития электроэнергетических систем одной из основных является задача обеспечения надёжности электроснабжения потребителей. Уровень надёжности электроснабжения должен быть достаточным для экономически эффективного функционирования потребителей, а также для обеспечения их безопасности, и в то же время рационально обоснованным с позиции вложения затрат в электроэнергетическую систему на создание и поддержание всех видов резервирования. Именно это положение является основополагающим при обосновании нормативов балансовой надёжности. Одним из самых чувствительных к изменениям в системе и информативных показателей балансовой надёжности, отражающих уровень надёжности электроснабжения, является вероятность бездефицитной работы. В статье представлена комплексная методика обоснования нормативной

величины вероятности бездефицитной работы. Методика основана на проверке величины норматива, учитывая разные аспекты его обоснования, а именно: экономическое обоснование; обоснование с позиции уровня надёжности технологических звеньев ЭЭС; обоснование на основе экспериментальных исследовательских расчетов; обоснование с позиции прошлого опыта эксплуатации энергосистемы; обоснование на основе экспертных оценок. Определение норматива балансовой надёжности в практической деятельности целесообразно на основании всех представленных критериев, но это не исключает применение как одного из них, так и нескольких по отдельности. В экспериментальной части статьи представлены обоснование нормативного значения вероятности бездефицитной работы на основании экономических оценок и анализ применения других рассмотренных в статье подходов.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0003) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. и за счет средств гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 21-03-12345) с использованием ресурсов ЦКП «Высокотемпературный контур» (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Аварийная опора для опоры ЛЭП



Источник: depositphotos.com



ЛЭП в сельской местности

Источник: depositphotos.com

Использованные источники

1. Постановление Правительства РФ от 30 декабря 2022 г. № 2556 «Об утверждении Правил разработки и утверждения документов перспективного развития электроэнергетики, изменении и признании утратившими силу некоторых актов и отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации».
2. Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б. Надёжность и резервирование в электроэнергетических системах. Новосибирск: Наука, 1974. – 263 с.
3. Надёжность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х томах, под общ. ред. Ю.Н. Руденко. Т 2. Надёжность электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 568 с.
4. Надёжность систем энергетики и их оборудования. Справочник: В 4-х томах, под общ. ред. Ю.Н. Руденко. Т 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надёжности систем энергетики. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.
5. Руденко Ю.Н. О подходах к нормированию показателей надёжности электроснабжения потребителей // Известия академии наук СССР. Энергетика и транспорт. №1, 1975. С. 14–23.
6. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Чудный В.С. Многокритериальная оптимизация при планировании развития энергосистем // Известия Российской академии наук. Энергетика. № 2, 2021. С. 3–11.
7. Маркович И. М. Режимы энергетических систем. – М.: Наука, 1986. – 252 с.
8. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. Под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
9. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 30.04.2021 г. № 321 «Об установлении нормативного уровня балансовой надёжности для Единой энергетической системы России, используемого при оценке возможности вывода генерирующего оборудования из эксплуатации».
10. ACER/CEER monitoring report of IEM, 2018.
11. ENTSO-E Target Methodology for Adequacy Assessment, 2014.
12. Reliability Standards for the Bulk Electric Systems of North America, (BAL-502-RF-03) February 15, 2018.
13. Ковалёв Г.Ф. Учёт фактора надёжности при оценке системных эффектов в электроэнергетике. – Новосибирск: Наука, 2018. – 217 с.
14. Непомнящий В.А. Агрегированные значения удельных ущербов от нарушений электроснабжения // ЭнергоРынок. № 9, 2014. С. 36.
15. Лебедева Л.М., Ковалёв Г.Ф., Крупенёв Д.С. Нормирование балансовой надёжности электроэнергетических систем и формирование резерва генераторной мощности // Надёжность и безопасность энергетики. № 11(1), 2018. С. 4–13.
16. Постановление Правительства РФ от 13.04.2010 г. № 238 (ред. от 02.09.2017 г.) «Об определении ценовых параметров торговли мощностью на оптовом рынке электрической энергии и мощности».



ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ПОЛИТИКА

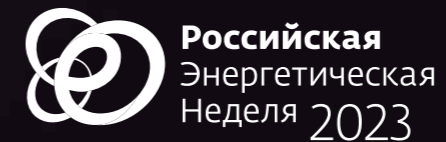


Оформить подписку на журнал «Энергетическая политика» на 2023 год можно через филиалы агентства «Урал-пресс», либо в ФГБУ «РЭА» Минэнерго России. По вопросам подписки звонить по телефону +7-910-463-53-57. Стоимость подписки на полугодие (6 номеров) составит 13 200 рублей.

В каждом номере – аналитические обзоры, авторские колонки, материалы научного и научно-прикладного характера. Будь в курсе основных направлений развития ТЭК!

energypolicy.ru

НАШИ ПАРТНЕРЫ



www.ge-gas.ru

**GE GAS
ENGINEERING**

НАШИ КОМПЕТЕНЦИИ — ВАШЕ ПРЕИМУЩЕСТВО



**ЭКСПЕРТЫ В ОБЛАСТИ
ПРИЁМА, ХРАНЕНИЯ И ОТГРУЗКИ
СЖИЖЕННЫХ ГАЗОВ**

Санкт-Петербург
Лиговский пр-т, 266-О

Москва
ул. Сретенка, д. 24/2, с. 1

+7 812 418 84 30
info@ge-gas.ru